

כנס החברה הגיאולוגית
2001
אילת

ISRAEL GEOLOGICAL SOCIETY

2001

ELAT

FIELD TRIPS





Israel Geological Society

2007

Elat

Field Trips

**Edited by:
Meir Abelson**

20-22 March, 2001

בגס החברה הגיאולוגית

2001

אילת

The Geological History of Amram Massif, Southern Israel

A. Mushkin¹, O. Navon¹, M. Stein¹, and L. Halicz²

1. Institute of Earth Sciences, The Hebrew University, Givat Ram, Jerusalem

2. Geological Survey of Israel, Jerusalem

INTRODUCTION

During this field trip we explore the Neoproterozoic alkaline rocks of Amram Massif, and study the field relations between them. We will reconstruct the geological history and petrogenesis of the Amram magmatic sequence, and discuss its relation to similar alkaline outcrops in this region.

Neoproterozoic alkaline magmatism in the northern Arabian-Nubian Shield (ANS), is associated with the transition from an orogenic related environment, to intra-plate, cratonic conditions, which occurred in this region at the end of the Precambrian and Early Cambrian (e.g. Garfunkel, 1980, 1999; Bentor, 1985). This transition lasted ~70 m.y, and is correlative to phase IV of Bentor (1985). It was characterized by reduction of regional relief, continuous erosion and sedimentation, faulting and emplacement of alkaline magmas which were followed by the intrusion of East-West orientated dike swarms, indicating some regional dilation (see summary by Garfunkel, 1999). The beginning of this transitional stage is constrained by the onset of alkaline magmatism. The oldest rock unit in this region displaying an alkaline affinity is a Quartz-Monzodiorite from the Timna Massif, which was dated to 599 ± 2 Ma (Beyth and Reischmann, 1996). The end of the transitional stage is marked by Early Cambrian sediments, which unconformably overlie the basement rocks in this region. The maximum age of this unconformity plain, the Peneplain, is best constrained by a 532 ± 5 Ma doleritic dike from the Timna Massif, which intrudes older rock units and dikes, and is truncated by the unconformity (Beyth and Heimann, 1999).

Alkaline rocks are scattered in southern Israel, southwestern Jordan and Sinai (i.e. northeastern ANS) (Fig. 1). In southern Israel, they outcrop in the Amram and Neshef Massifs (Wurtzburger, 1959; Agron, 1977; Agron and Bentor, 1981; Kessel 1995; Mushkin et al., 1999), the Timna Massif (Beyth et al., 1994), and in the Eilat and Roded Massifs (Eyal and Peltz, 1994; Peltz and Eyal, 1995; Katz et al., 1998; Paz, 1997; Gutkin and Eyal, 1998; Kessel et al., 1998). Neoproterozoic, volcanic to sub-volcanic alkaline

rocks outcrop in Wadi Araba, Southwest Jordan (e.g. Jarrar et al., 1992). In Sinai, large alkaline outcrops occur in the Katherina, Iqna, Wadi Kid and Zahara provinces as well as other smaller volume bodies (e.g. Bentor and Eyal, 1987). Alkaline dike swarms penetrate many of the basement rocks in the Sinai Peninsula (Szafranek, 1978;

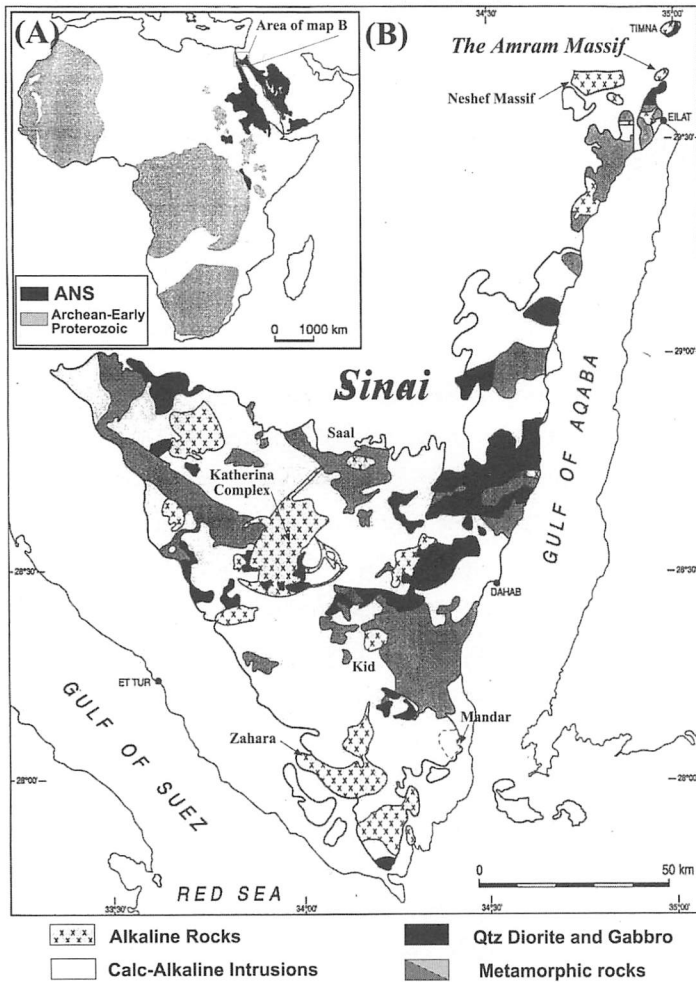


Figure 1
(A) Outcrops of the Arabian-Nubian Shield (ANS). (B) Location map of ANS outcrops in Sinai and southern Israel (modified from Bielski, 1982).

Friz-Toepfer, 1991).

The Neoproterozoic alkaline rocks of the northeastern ANS resemble post-orogenic alkaline granites known from closing stages of other orogenic events, and commonly classified as A-type granites (Anorogenic, Alkaline granites, Loiselle and Wones, 1979). Most of the A-type rocks in the northeastern ANS display a narrow range of moderately positive initial ϵ_{Nd} values (+1.5 to +5.1), and relatively low initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ values (0.7028 to 0.7047), and have been associated with mantle sources (e.g. Bielski,

1982; Beyth et al., 1994; Stein and Goldstein, 1996; Moghazi et al, 1998; Kessel et al., 1998; Jarrar, 2000). The A-type magmas of this region display common chemical characteristics (Mushkin et al., in prep.), and in cases where field relations were determined, similar magmatic sequences of A-type magmatism were revealed. The alkaline bodies of Timna, Katherina, Neshef and Amram (Fig. 1) consist of similar lithologies, displaying a pattern of increasing silica content with decreasing stratigraphic ages (Mushkin et al., 1999).

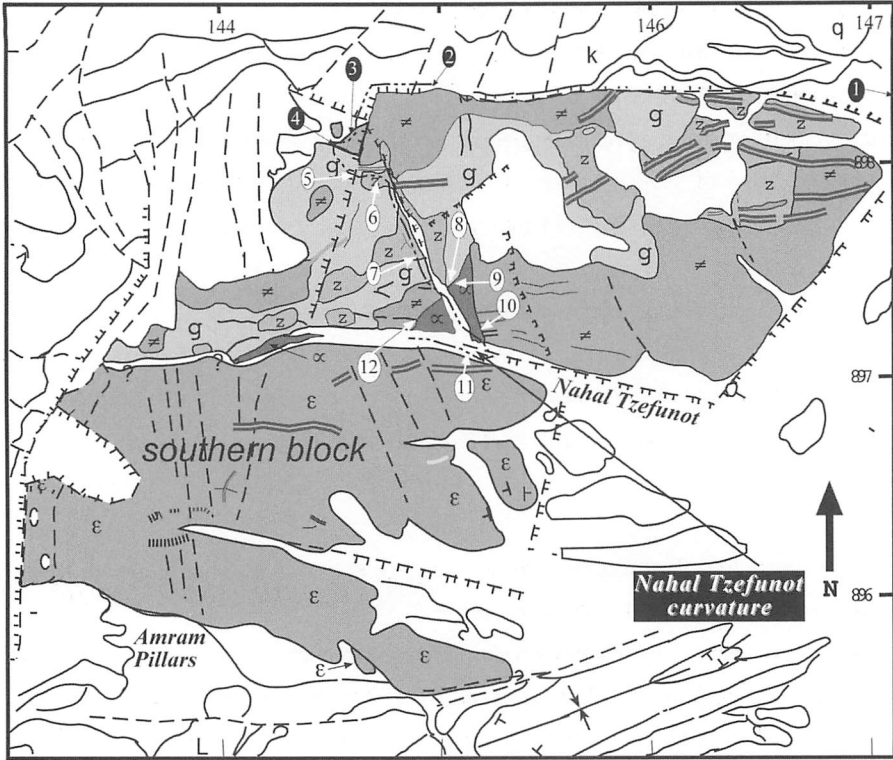
Neoproterozoic A-type magmas of the northeastern ANS, herald the subsequent Phanerozoic alkaline magmas of this region, which are characterized by similar isotopical compositions and have been related to lithospheric mantle sources (Stein and Goldstein, 1996; Stein et al., 1997; Weinstein, 1998).

The Amram Massif outcrops over an area of 6 km², and consists of

GEOLOGY OF AMRAM MASSIF

volcaniclastic units, rhyolites, three hypabyssal intrusions, and mafic to felsic dikes which intrude these rock units (Mushkin et al., 1999) (Fig. 2). This magmatic sequence is unconformably overlain by Early Cambrian sandstones (Wurtzburger, 1959; Parnes, 1971; Mushkin et al., 1999). Petrological, geochemical, and structural similarities to the nearby Neshef Massif closely relate the two as one Neoproterozoic geological unit spanning over 70 km², and broken apart by Late Cenozoic tectonic activity (Mushkin et al., 1999).

The main rock units outcropping in the massif are (Fig 2; Table 1): *Alkali Granite* containing 60.0 to 67.5 wt% SiO₂ (holocrystalline with 60% subhedral alkali feldspar, 30% anhedral quartz and 10% chlorite and opaque minerals in varying ratios); *Porphyric Rhyolite* containing 72.9 to 76.5 wt% SiO₂ (up to 30% phenocrysts of alkali feldspar and quartz in a microcrystalline groundmass of similar composition); *Monzonite* containing 50.6 to 53.0 wt% SiO₂ (holocrystalline- with 40% plagioclase, 25% alkali feldspar, 10% clinopyroxene, 25% chlorite and opaque minerals, and quartz and apatite as accessory minerals); *Quartz Syenite* containing 60.1 to 67.5 wt% SiO₂ (holocrystalline with 65% alkali feldspar, 15% quartz, 20% clinopyroxene and accessory chlorite, amphibole, plagioclase and opaque minerals), and dikes of mafic to felsic compositions. Some of the dikes are composite, and consist of mafic margins with a felsic center. The relatively small crystal size (up to 3 mm) of the plutonic units, the granophyric textures, and the perthitic nature of the alkali feldspars in some of these intrusions, indicate shallow



Legend:

- | | | |
|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Quartz Syenite | Dolerite dike | Phanerozoic sediments |
| Monzonite | Composite dike | Fault |
| Rhyolite | Mafic dike | Dip |
| Alkali Granite | Felsic dike | Excursion stop |
| Rhyolite overlying volcaniclastics | 0 km 1 | |

Figure 2: Geological map of Amram Massif (Mushkin et al., 1999). The massif is bordered on all sides by Cenozoic faults, and is divided into northern and southern blocks. Rhyolites and volcaniclastic units comprise the southern block, while similar Rhyolites and hypabyssal plutons comprise the northern block.

depths of crystallization.

Field relations, petrography, and geochronology of the Amram Massif rocks reveal the following sequence of geological events (see Mushkin et al., 1999 for detailed description): (1) Deposition of volcaniclastic units and intrusion of hypabyssal Alkali Granite followed by uplift and erosion. (2) Eruption of Rhyolites onto the exposed

Alkali Granite. (3) Mafic dikes intruded the above sequence, followed by the emplacement of hypabyssal Monzonite, Quartz Syenite and Composite dikes. (4) Further uplift exposed the hypabyssal plutons to erosion, prior to the deposition of the Cambrian sandstones. Magmatic activity in Amram Massif was most probably terminated by the intrusion of East-West trending doleritic dikes in the southern block. Normal faulting, most likely in an East-West orientation, accompanied the emplacement of the Amram intrusions.

The Amram magmatic sequence spans a period of up to 20 m.y (ca. 550-530 Ma, Mushkin et al., 1999), and reveals the occurrence of at least two magmatic cycles, in which the silica content of rocks increases as their stratigraphic age decreases (Fig. 3). Rocks belonging to the second magmatic cycle were dated by the Rb-Sr isochron method, to 526 ± 22 Ma with an initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of 0.7036 ± 2 (Mushkin et al., 1999). The present exhumation of the Amram magmatic rocks is related to Late Cenozoic tectonic activity along the Dead Sea Transform (Garfunkel, 1970).

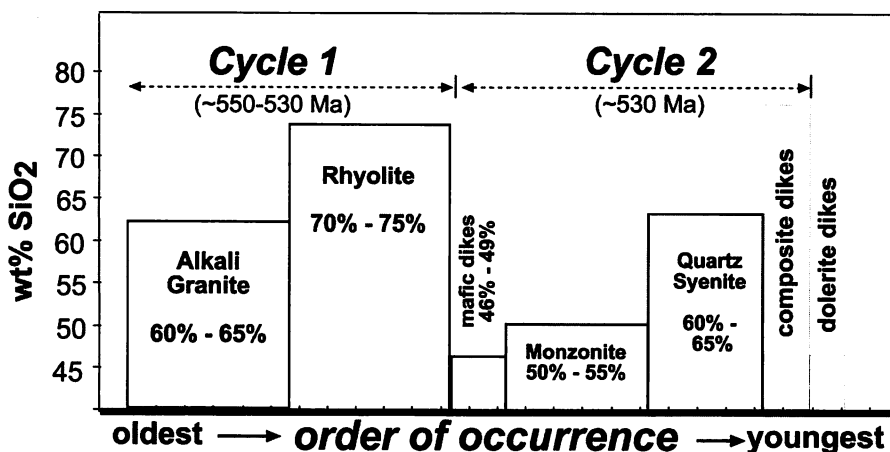


Figure 3: Average SiO₂ content of the Amram rocks plotted according to their order of occurrence, as determined by field relations. Two magmatic cycles of fractional crystallization are revealed. Cycle 1 is represented by its felsic members — Alkali Granite and Rhyolite, cycle 2 is comprised of mafic dikes, Monzonite, Quartz Syenite and composite dikes. Cycle 1 rocks are constrained to ~550-530 Ma by correlation to similar rocks from Wadi Araba (553 ± 11 Ma, Jarrar, 1992) and the Neshef Massif (548 ± 5 / 529 ± 12 , Bielski, 1982; Segev, 1987 — re-evaluated data of Bielski, 1982). Cycle 2 rocks yielded a Rb-Sr isochron age of 526 ± 22 Ma (Mushkin et al., 1999), but most likely predate Dolerite dikes from this region, which have yielded an Ar-Ar age of 532 ± 5 Ma (Beyth and Heimann, 1999). Hence, Cycle II is constrained to ~530 Ma.

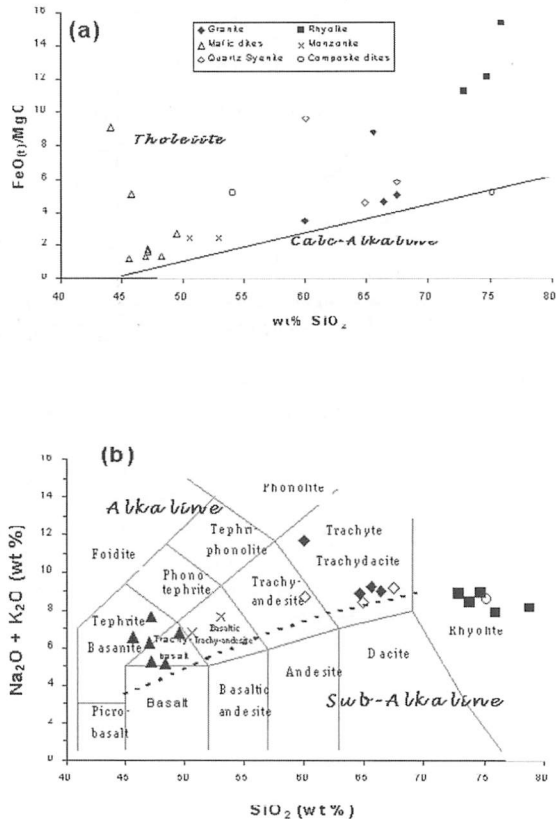
The Amram rocks display a wide and almost continuous range of mafic to felsic compositions (45.6 — 78.8 wt% SiO₂, Table 1), high FeO₀/MgO ratios, and high concentrations of alkali elements, implying alkaline affinity (Fig. 4). Furthermore, on variation diagrams of silica vs. major and trace element concentrations (Fig. 5), the Amram rocks develop along well-defined smooth lines, thus suggesting that they share a similar petrogenetic path.

The Amram rocks display a narrow range of positive initial ε_{Nd} values (+1.5 to +3.0, Mushkin, 2000), and a relatively low initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr value (0.7036±2, Mushkin et al., 1999). This, together with low silica content (45.5-49.8 wt%) and high MgO content (4.10-8.95 wt%) in the Amram mafic dikes, relates the Amram sequence to mantle

% wt	Alkali Granite		Rhyolite		mafic dikes		Monzonite		Quartz Syenite	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
SiO ₂	60.0	67.5	72.9	76.5	45.6	49.5	50.6	53.0	60.1	67.5
TiO ₂	0.62	0.84	0.19	0.26	1.79	2.30	1.82	2.39	0.65	1.07
Al ₂ O ₃	11.1	13.8	10.5	11.1	15.2	16.0	14.8	15.3	12.7	14.4
Fe ₀ O ₁₁	5.60	7.60	2.80	4.49	10.3	12.5	8.37	11.6	5.36	8.23
MgO	0.60	1.80	0.18	0.40	4.10	8.95	3.04	4.88	0.77	1.54
Na ₂ O	2.76	3.21	0.29	3.34	2.76	5.56	4.84	5.12	3.27	4.18
CaO	0.80	1.70	0.18	0.83	1.74	5.47	2.45	4.49	1.00	3.16
K ₂ O	5.80	8.92	4.50	8.66	1.22	3.79	1.96	2.52	4.55	5.90
P ₂ O ₅	0.10	0.30	0.01	0.02	0.39	1.20	1.22	1.45	0.21	0.37

Table 1: Major element chemical classification of the Amram rock units.

Figure 4: (a) FeO₀/MgO versus SiO₂ and (b) Total Alkali versus SiO₂ (TAS) of selected samples from the Amram Massif. All the Amram rocks plot in the tholeiite field in (a), and display an alkaline affinity in (b). Tholeiite and calc-alkaline fields in (a) from Miyashiro (1974); Fields in (b) from Le Bas et al. (1982), Alkaline and sub-alkaline fields from Irvine & Baragar (1971).



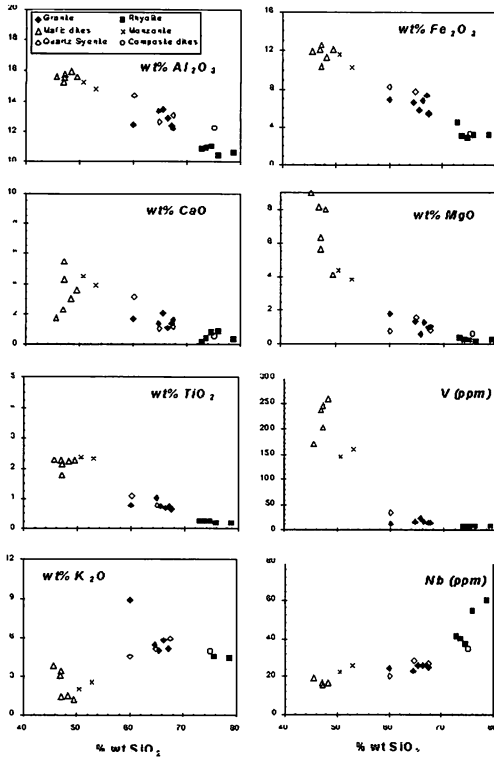


Figure 5: Selected major and trace element concentrations plotted against wt% SiO₂ of the Amram rocks. Element concentrations develop along well-defined smooth lines.

sources. Uniform ratios of similarly incompatible elements (e.g. Y/Nb=1.6±0.3, Fig. 6), displayed by all Amram rocks imply no significant crustal contamination or assimilation during the evolution of the Amram

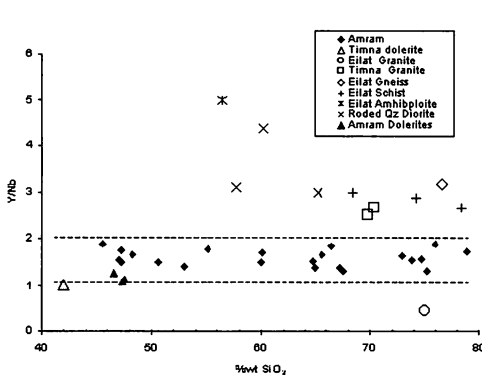


Figure 6: Y/Nb versus %wt SiO₂ for the Amram sequence and nearby Neoproterozoic outcrops older than 550 Ma (i.e. potential assimilants). The Y/Nb ratio in the Amram rocks is uniform and distinct from that of the potential assimilants, suggesting no crustal contamination.

magmatic sequence were produced by at least two cycles of fractional crystallization. This suggests that the felsic rocks of Amram Massif represent a much larger volume of unexposed parental mantle derived mafic magmas.

EXCURSION STOPS

The excursion to Amram Massif begins with a general view of the massif from Nahal Evrona. We then proceed by bus to the seismic station at the northwestern foothills of the massif, where we begin a North to South traverse by foot of the northern part of the massif (Fig 2). The excursion includes 12 planned stops, and will end in the Nahal Tzefunot curvature.

Stop 1 General view of Amram Massif

Location: Road to seismic station at Nahal Evrona, coord. 14780/89790

Looking westward we can see the dark red to greenish brown magmatic rocks comprising the northern block of Amram Massif, and the surrounding light colored Phanerozoic sediments. The present day exhumation of the Amram magmatic rocks is related to Late Cenozoic normal faults, which border the massif on all sides. Directly to the west, at the top of Mt. Amram the unconformity plain separating the Amram magmatic sequence from the overlying Cambrian Sandstones of the Shehoret formation can be seen dipping slightly to the northwest.

The cliffs directly beneath the unconformity plain are comprised of the Amram Alkali Granite. At the eastern slopes of Mt. Amram we can see the typically pink to purple rugged cliffs and hills of the Amram Rhyolite. North of Mt. Amram, the extensively weathered Quartz Syenite with its typical brownish yellow coloration outcrops in a crescent shaped valley. Composite dikes, 10-30 meters wide intrude this part of the massif in an East-West to Northeast-Southwest direction, and form elongated topographic crests. One of these dikes is truncated by the unconformity plain at the top of Mt. Amram.

The summits of the hills in the southern part of the massif reach elevations exceeding 500 meters above sea level, and can be seen behind the Mt. Amram. Note that Cambrian sandstones are not present on the summits of the southern block.

Stop 2 The Amram Rhyolite

Location: Parking area at the Nahal Evrona seismic station, coord. 14500/89840

The cliffs to the south, rising 200 meters above the parking area, are comprised of the Amram Rhyolite. This dark pink to purple porphyric rock, with phenocrysts up to 5mm

of alkali feldspar and quartz in an aphanitic matrix, is the most widely exposed rock unit in the massif.

From here we follow the black labeled path to the west and climb to the saddle at the top of the wadi.

Stop 3 The unconformity plain

Location: Saddle at northwestern tip of the massif, coord. 14460/89810

Here we can see the contact between the Amram Rhyolite and the unconformably overlaying Cambrian sandstones. The sandstones were deposited on top of an existing topographical relief.

We proceed along the black labeled path to where it meets the red labeled path.

Stop 4 Contact between the Rhyolite and the Alkali Granite

Location: At the crossing of the black and red paths, coord. 14455/89805

Looking to the East, a sharp vertical contact between the Rhyolite to the north and the Alkali Granite to the south can be seen. Varying degrees of weathering and alteration of the Alkali Granite (phaneritic rock, with crystals up to 5mm of mainly alkali feldspar, quartz, and opaque minerals) lead to a wide range of colors (dark red to brownish yellow), which may complicate its identification in the field. In some cases the quartz and opaque minerals may seem to be phenocrysts, surrounded by a dark red matrix (the alkali feldspar), and can therefore resemble the Rhyolite. However, the two can be distinguished by the typical purple coloration of the Rhyolite, and the phenocrysts of alkali feldspar, which can usually be identified in the Rhyolite.

The chemical distinction between the Rhyolite (~73-77 wt% SiO₂) and the Alkali Granite (~60-68 wt% SiO₂), together with similar sharp contacts between these rocks in other parts of the massif, imply that these are two distinct rock units and not an artifact of differential cooling rates of the same magma. A Rhyolitic dike intruding the Alkali Granite in the western part of the massif (coord. 14440/89750) indicates that the former postdates the latter.

From here we proceed southward with the red path climbing down into the Nahal Tzefunot canyon.

Stop 5 Mafic dikes in the massif

Location: Inside the Nahal Tzefunot canyon, coord. 14460/89795

Walking inside a 5-10 meters wide canyon, we can see a 1/2-meter wide, mafic dike

intruding the southern wall in an East-West orientation. The host rock is the Alkali Granite. Such aphanitic mafic dikes outcrop throughout the massif, and represent the parental mafic magmas from which the rest of the Amram rocks were fractionated. We continue to walk eastward in Nahal Tzefunot.

Stop 6 The Quartz Syenite

Location: Southern bank of Nahal Tzefunot, coord. 14470/89790

As we leave the Nahal Tzefunot canyon we encounter the Amram Quartz Syenite to our right on the southern bank of the wadi. Here, this extensively weathered phaneritic rock, with crystals up to 5mm of mainly alkali feldspar, mafic minerals and accessory quartz, outcrops with its typical brownish-yellow coloration. Usually concentrated in wadis, outcrops of this extensively weathered rock display a smooth and rounded ("boulder like") morphology, and spherical "onion like" weathering patterns. In other locations the Quartz Syenite contains xenoliths of the other rock units.

From here we walk along Nahal Tzefunot, and can enjoy the impressive Alkali Granite cliffs, on both sides of the wadi.

Stop 7 Contact between Quartz Syenite and Alkali Granite

Location: Western bank of Nahal Tzefunot, coord. 14495/89750

After passing two "elusive" contacts between the Alkali Granite and the Quartz Syenite on the western bank of the Nahal Tzefunot, we arrive at a sharp contact between these two units. This contact can be seen on the western bank of Nahal Tzefunot just south of a small wadi coming into Nahal Tzefunot from the west. Climbing 50 meters up the small wadi we can see a large (1X1m) xenolith of the Alkali Granite in the Quartz Syenite. This, together with similar contacts between these two rock units, indicates that the Quartz Syenite intruded the Alkali Granite, and thus postdates it.

On the opposite bank of Nahal Tzefunot, east of this stop, we can also see the contact between the relatively gently sloping Quartz Syenite and the ~100 meter cliffs of the Alkali Granite.

Stop 8 The Amram Monzonite

Location: On the eastern bank of Nahal Tzefunot, coord. 14505/89740

Here we encounter the Amram Monzonite for the first time. This phaneritic rock with crystals up to 2mm of alkali feldspar, plagioclase and mafic minerals outcrops in small bodies in the central part of the massif. It has a greenish-yellow coloration, and in some

places displays smoothed weathering patterns similar to those of the Quartz Syenite. Laths of plagioclase can be identified macroscopically, and help distinguish it from the Quartz Syenite.

Stop 9 Contact between Alkali Granite, Monzonite, and the Cambrian sandstones

Location: 30 meters east of stop 8, coord. 14510/89740

Walking 30 meters up a small creek on the eastern bank of Nahal Tzefunot we can see a clear contact between the Alkali Granite and the Monzonite, on the left (northern) side of the creek. At the base of a 20 meters high Alkali Granite cliff, on the north side of the creek, we can see a sharp contact with the Monzonite. The latter comprises the bedrock of the creek, and the 30 meters high cliffs to the south. Near the contact, xenoliths of the Alkali Granite can be seen inside the Monzonite, indicating that the latter intruded the former.

Looking 100 meters eastward up the creek, we can see Cambrian sandstones overlaying the Monzonite. This contact implies that the hypabyssal Monzonite was exhumed prior to the deposition of the Cambrian sandstones. Similarly, a 50 meters vertical distance between the hypabyssal Quartz Syenite, and the Cambrian sandstones at the top of Mt. Amram (coord. 14580/89765, view from Stop 1), indicates significant uplift of the former prior to the deposition of the latter.

From here we continue southward to the Nahal Tzefunot curvature, and then turn left (east) to the next stop.

Stop 10 Mafic dikes in relation to the Rhyolite and the Monzonite

Location: 50m East of Nahal Tzefunot curvature, coord. 14525/89710

Looking northwards, up a north-south oriented creek, which extends from the northern bank of Nahal Tzefunot, we can see a 2 meters wide east-west mafic dike intruding the Rhyolite on the right (east) side of the creek, but not the Monzonite on the left (west) side of the creek.

Stop 11 The southern block

Location: Opposite stop 10, coord. 14510/89705

Amram Massif is divided into two blocks by the wadi extending directly to the west. We have explored the main features of the northern block. The southern block is comprised of the Amram Rhyolite as well as volcanoclastic units. Dikes similar to those of the northern block intrude the southern block.

Here we can see Rhyolites displaying fine flow structures overlain by massive

Rhyolites. Similarly, massive Rhyolites overlie volcanoclastic units in the eastern parts of the southern block (coord. 14520/89645). Volcanoclastic units were not found on top of the massive Rhyolites.

From here we backtrack westward to the last stop.

Stop 12 Contact Rhyolite — Monzonite

Location: 100 meters West of Nahal Tzefunot curvature, coord. 14490/89735

Looking northwards to the northern bank of the wadi, we can see a clear contact between the pink to purple Rhyolite on the left (west), and the greenish-yellow Monzonite on the right (East). A mafic dike intrudes the Rhyolite on the top part of the slope, and does not intrude the Monzonite. Note that the contact between the rock units is 10 meters to the west of the saddle.

We climb up to the saddle to examine the contact. At the saddle we can see xenoliths of the Rhyolite in the Monzonite up to ~20 meters east of the contact. Crossing the saddle 30 meters to the North, we can see the intrusive nature of the contact on the western slopes.

For a detailed geological history of Amram Massif see Mushkin et al. (1999).

REFERENCES

- Agron, N., 1977. The geology of Biq'at Hayareah. M.Sc. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 64 pp.
- Agron, N. and Bentor, Y.K., 1981. The volcanic massif of Biq'at Hayareah (Sinai-Negev); a case of potassium metasomatism. *Journal of Geology*, 89: 479-496.
- Bentor, Y. and Eyal, M., 1987. The Geology of Southern Sinai. Its Implication for the Evolution of the Arabo-Nubian Shield. Volume I, Jebel Sabbagh Sheet. The Israel Academy of Sciences and Humanities, Jerusalem, 484 pp.
- Bentor, Y.K., 1985. The crustal evolution of the Arabo-Nubian Massif with special reference to the Sinai Peninsula. *Precambrian Research*, 28: 1-74.
- Beyth, M. and Heimann, A., 1999. The youngest igneous event in the crystalline basement of the Arabian-Nubian Shield, Timna Igneous Complex. *Israel Journal of Earth Sciences*, 48: 113-120.
- Beyth, M. and Reischmann, T., 1996. The age of the quartz monzodiorite, the youngest plutonic intrusion in the Timna igneous complex. *Israel Journal of Earth Sciences*, 45: 223-226.
- Beyth, M., Stern, R.J., Altherr, R. and Kroener, A., 1994. The late Precambrian Timna igneous complex, southern Israel: evidence for comagmatic-type sanukitoid

- monzodiorite and alkali granite magma. *Lithos*, 31: 103-124.
- Bielski, M., 1982. Evolution stages of the Arabo-Massif in the Sinai. Ph.D. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 51 pp.
- Eyal, M. and Hezkiyahu, T., 1980. Katherina Pluton; the outlines of a petrologic framework. *Israel Journal of Earth Sciences*, 29(1-2): 41-52.
- Eyal, M. and Peltz, S., 1994. The structure of the Ramat Yotam Caldera, southern Israel; a deeply eroded late Precambrian ash-flow caldera. *Israel Journal of Earth Sciences*, 43: 81-90.
- Friz-Toepfer, A., 1991. Geochemical characterization of Pan-African dyke swarms in southern Sinai; from continental margin to intraplate magmatism. *Precambrian Research*, 49: 281-300.
- Garfunkel, Z., 1970. The tectonics of western margin of the southern Arava. Ph.D. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 204 pp.
- Garfunkel, Z., 1980. Contribution to the geology of the Precambrian of the Elat area. *Israel Journal of Earth Sciences*, 29(1-2): 25-40.
- Garfunkel, Z., 1999. History and paleogeography during the Pan-African orogen to stable platform transition: reappraisal of the evidence from the Elat area and the northern Arabian-Nubian Shield. *Israel Journal of Earth Sciences*, 48: 135-157.
- Gutkin, V. and Eyal, Y., 1998. Geology and evolution of Precambrian rocks, Mt. Shelomo, Elat area. *Israel Journal of Earth Sciences*, 47(1): 1-17.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- Jarrar, G., 2000. Petrogenesis and tectonic setting of Neoproterozoic granites from the Northernmost Arabian Shield, SW Jordan. *Geological Society of America - Abstracts with Programs*, 32: A-249.
- Jarrar, G., Wachendorf, H. and Saffarini, G.A., 1992. A late Proterozoic bimodal volcanic/ subvolcanic suite from Wadi Araba, Southwest Jordan. *Precambrian Research*, 56: 51-72.
- Katz, O., Avigad, D., Matthews, A. and Heimann, A., 1998. Precambrian metamorphic evolution of the Arabian-Nubian Shield in the Roded area, southern Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, 47(2): 93-110.
- Kessel, R., 1995. The geochemistry of dykes and their host rocks from the latest stages in the Pan African orogeny, Amram and Elat massifs, southern Israel. M.Sc. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 121 pp.
- Kessel, R., Stein, M. and Navon, O., 1998. Petrogenesis of late Neoproterozoic dikes in

- the northern Arabian-Nubian Shield; implications for the origin of A-type granites. *Precambrian Research*, 92: 195-213.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Steckeisen, A. and Zanettin, B., 1982. A chemical classification of volcanic rocks based on the Total alkali-Silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.
- Loiselle, M.C. and Wones, D.R., 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America - Abstracts with Programs*, 92: 468.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in Island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274: 321-355.
- Moghazi, A.M., Andersen, T., Oweiss, G.A. and Bouseily, A.M., 1998. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic data bearing on the origin of Pan-African granitoids in the Kid area, southeast Sinai, Egypt. *Journal of the Geological Society of London*, 155: 697-710.
- Mushkin, A., 2000. The geology, geochemistry, and geochronology of the post-orogenic alkaline rock suite of Amram Massif, southern Israel. M.Sc. Thesis, Hebrew University, Jerusalem, 55 pp.
- Mushkin, A. et al., 1999. Geology and geochronology of the Amram Massif, southern Negev Desert, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, 48: 179-193.
- Parnes, A., 1971. Late lower Cambrian Trilobites from the Timna Area and Har 'Amram (Southern Negev, Israel). *Israel Journal of Earth Sciences*, 20: 179-205.
- Paz, Y., 1997. The geology and stratigraphy of the volcano-sedimentary units in Nahal Netafim and Nahal Roded in the Elat Area. M.Sc. Thesis, Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva, 120 pp.
- Peltz, S., Eyal, M., 1995. Lithology and volcanic stratigraphy of Giv'ot Shehoret, Elat region. TR-GSI/10/95, Geological Survey of Israel.
- Segev, A., 1987. The age of the latest Precambrian volcanism in southern Israel, northeastern Sinai and southwestern Jordan; a re-evaluation. *Precambrian Research*, 36: 277-285.
- Stein, M. and Goldstein, S.L., 1996. From plume head to continental lithosphere in the Arabian-Nubian Shield. *Nature*, 382: 773-778.
- Stein, M., Navon, O. and Kessel, R., 1997. Chromatographic metasomatism of the Arabian-Nubian lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 152: 75-91.
- Szafrańek, 1978. Dykes in the Southeastern Part of the Precambrian massif of Sinai. M.Sc. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 99 pp.
- Weinstein, Y.S., 1998. Mechanisms of generation of intra-Continental Alkali-Basalts in

Northeastern Israel. Ph.D. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 101 pp.

Wurtzburger, U., 1959. The geology and petrography of the Amram mountains. M.Sc. Thesis, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem.

הבוררות (16 עמודי גבול במחלוקת) הגיעו הצדדים בשנת 1986 וזאת ארכה כשנתיים. האבן האחרונה הונחה בשנת 1989 ומיד לאחר מכן החל שלב התעוד.

בסה"כ סומנו 99 עמודי גבול סמוך מאוד למיקומם של עמודי הגבול משנת 1906. בחלק מהנקודות נמצאים הישן והחדש גם יחד. עמוד הגבול עשוי משתי יחידות. הבסיס מבטון בגובה של 1.5 מטר והצינור המותקן עליו במידות של 1.5 או 3 מטר. על עמוד הגבול מוטבע מספרו (גם בערבית) לשני צידי הגבול. תעוד הגבול בוצע ע"י שני הצדדים באמצעות גיאודזיה לווזינית-GPS. המדידות בוצעו במשותף ע"י שני הצדדים אך עיבוד הנתונים בנפרד. גם בשלב זה התעוררה מחלוקת לגבי ערכי הקואורדינטות שיושבה בפשרה. נקבע דאטום גבול מיוחד בשם IEBD92 שהוא דומה ל-WGS84. הסכם התיעוד כמעט והגיע לקו הסיום. מסיבות שונות, הוא לא הושלם וממתין לחתימה. חשיבותו רבה. במידה ותתעורר מחלוקת בעתיד, הקואורדינטות המוסכמות והחתומות, ייקבעו ויקצרו תהליכים באופן דרמטי.

בתדירות של אחת לחודש וחצי לערך מבוצעות מדידות כיול בלתי כיול מחוץ למנהרה. מדידות אלה חיוניות לכיול ציוד המדידה וכדי לתקן תופעות הנובעות מפעילות רציפה של הציוד כמו DRIFT. באותה עת מועברים הנתונים למרכז למיפוי ישראל. בעתיד הקרוב מתוכנן קו תקשורת רציף. הנתונים מועבדים בתאום עם נתונים דומים ממצפה אמציה ליד קרית גת. הנתונים המועבדים נשמרים באתר מחקר באינטרנט בכתובת: WWW.SOI.GOV.IL והם פתוחים לכל. במהלך שנת 2001 תוצב במנהרה מערכת מגנטית ייחודית (ייתכן אף מערכת ראדון) במסגרת קרן מחקר ישראל קנדה. במחקר משתתפים המרכז למיפוי ישראל, ממ"ג שורק, המכון הגיאולוגי, חברת GEM בקנדה. באמצעות מערכת רגישה זאת מקווים החוקרים למצוא קשר בין רעידות אדמה לתופעות מגנטיות (בדומה לקשר שנמצא בין ראדון לרעידות אדמה).

גבול ישראל הצרים

(ע"פ דר' גרשון שטיינברג)

בהסכם השלום בין ישראל למצרים נקבע כי קו הגבול יהיה " הגבול הבנלאומי המוכר בין מצרים לשטח הטריטוריה של פלסטין המנדטורית". לאחר חתימת הסכם השלום בין ישראל למצרים בשנת 1979, החלו צוותים מקצועיים לעבוד בנושא סימון קו הגבול. הבסיס לעבודה היה קו הגבול שנקבע בשנת 1906 וסומן ע"י משלחת טורקית אנגלית שנה לאחר מכן. היה זה למעשה קו גבול אדמיניסטרטיבי בין חלקים שהיו שייכים לאימפריה הטורקית. ייחודו בין היתר שקיים קו ראייה בין כל שתי נקודות גבול סמוכות. פרט זה שימש מאוחר יותר, בשלב הבוררות על טאבה, כנקודת טיעון חשובה לצד הישראלי. כזכור, הבוררות הוכרעה בניגוד לעמדה הישראלית. בקו הגבול המקורי, המנדטורי, סומנו 91 עמודי גבול. למעלה מ-30 מהם (הדרומיים) נמצאו כמעט בשלמותם (והקלו על תהליך הסימון מחדש). לגבי היתר, לרוב נמצאו שרידים שלהם. בתהליך הסימון, אומצה לבסוף העמדה והעזרים הישראליים, כאשר מחלוקות היו לאורך כל הדרך. גודל המחלוקת בין שני הצדדים הגיע אף ל-1700 מטר, אך לרוב היה בסדרי גודל של מטרים בודדים. מאחר והמדובר במודדים (כל סנטימטר חשוב...) התהליך לא היה קל ופשוט. 83 עמודי גבול הוצבו בתחילת שנת 1982, רובם באמצעות רכב מיוחד וחלקם באמצעות מסוק. עמודי הגבול שהיו במחלוקת הוצבו בסוף 1988 לאחר סיום הבוררות. בעת הנחת עמוד גבול 51 (מערבית לעין המערה) באמצעות מסוק יסעור, קרתה תאונה בה נהרג הטייס. בעקבות הונחו שאר העמודים באמצעות רכב בלבד. אגב, גם בשלב תעוד קו הגבול המסומן, התעוררה מחלוקת ביחס לקואורדינטות של עמודי הגבול. דיונים רבים עברו על הצדדים עד ליישובה בפשרה. לתהליך

3. מיקרו-מערך סיסמי ניסיוני ("אנטנה סיסמית") בן 10 נקודות מדידה המפוזרות סביב המצפה. האנטנה הסיסמית הניסיונית משמשת את האגף לסיסמולוגיה בפיתוח שיטות עיבוד נתונים מתקדמות לשיפור יכולות הניטור הסיסמי בישראל.

התנאים הלוגיסטיים באתר המצפה הגיאופיסי מאפשרים הקמתן של מערכות מדידה נוספות. בשנת 1998 הוצבה במצפה, על ידי המרכז למיפוי ישראל התחנה הגיאומגנטית.

בתכנון : הקמת מערכת מיקרו מגנטית ניסיונית (מחקרית) של שורק, מפ"י, מכון גיאולוגי מערכת לניטור רדון (מכון גיאולוגי + שורק)
מערכת למדידת השדה הגיאומגנטית (מפ"י + אונ. ת"א + רפא"ל)

המרכז למיפוי ישראל
מפעיל ציוד מדידה

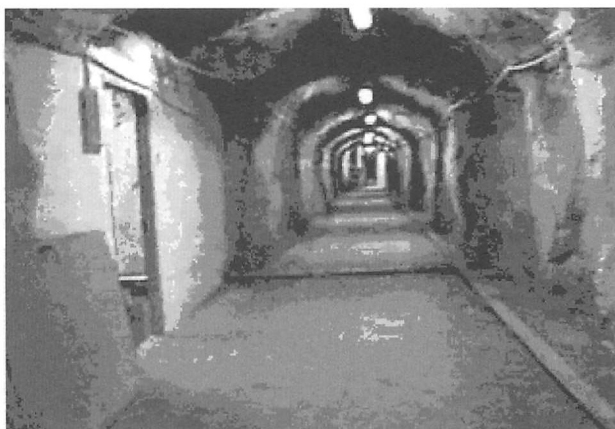
פעילות מגנטומטרית במנהרת מחקר אילת

גאומגנטי במנהרת המחקר הגיאופיסי הסמוכה לאילת מתחילת 1998. הפעילות תואמה ואושרה ע"י דר' אבי שפירא מנהל תחום סיסמולוגיה במכון הגיאופיסי.

במקביל, ובאופן דומה, מפעיל המרכז את מיצפה אמציה הסמוך לקרית גת. מיצפה זה קיים משנת 1975 והוא משרת ומייצג את הפעילות הגאומגנטית הלאומית בישראל. ישראל קשורה למרכז נתונים מגנטי עולמי והיא מספקת לו באופן חופשי ורציף את נתוני המדידה.

החישנים המגנטיים מודדים את שלושת רכיבי השדה המגנטי בחולוציה של 0.5 ננו-טסלה. החישנים ממוקמים בקצה הדר' מז' של המנהרה כדי להקטין את השפעות לא רצויות.

הציור ממחיש את מראה פנים המנהרה:



4. מגנטומטר למדידה רציפה של השדה המגנטי.

תנאי המדבר, הריחוק ממקום ישוב, סלע הגרניט בו נחצבה המנהרה ואופן בנייתה אפשרו ביצוע מדידות בתנאי רעש רקע מאד נמוכים ובתנאים של טמפרטורה קבועה ולחץ קבוע. שינויים מזעריים של לחץ וטמפרטורה היו מיד משפיעים על המדידות ומעוותים אותם (במיוחד במערכות VLP, SM ו-TM). ייחוד נוסף של המצפה הגיאופיסי היה בכך שפעלו בו המערכות המסחריות הראשונות לרישום דיגיטלי של הנתונים.

במשך כעשור שנים היה המצפה הגיאופיסי ע"ש אדולפו בלוך בהר עמרם אחת התחנות הסיסמיות הטובות והרגישות בעולם. ואולם, פיתוח טכנולוגי מואץ, שמצא ביטוי גם בפיתוח מערכות סיסמומטריות רגישות יותר וקטנות יותר במימדיהן, הביא להתישנות מואצת של ציוד המצפה עד כי לא התאים יותר לדרישות המחקריות של מכון ויצמן למדע והפעלתו הופסקה בשנת 1980.

האתר עמד בשימומו עד לשנת 1994. בשנה זו נחתם הסכם בין מינהל המחקר במדעי האדמה לבין מכון ויצמן למדע על הפעלתו מחדש של המצפה. האגף לסיסמולוגיה במכון הגיאופיסי לישראל קיבל על עצמו את הפעלת המצפה ומאז 1995 הוא מהווה חלק מהמערך הסיסמי של ישראל.

המצפה הגיאופיסי הוא בראש ובראשונה תחנה סיסמומטרית משוכללת. במצפה פועלות כיום שלוש מערכות סיסמומטריות:

1. מערכת תחום רחב (BB - Broad Band), שמאפשרת מדידת תנודות קרקע בתחום תדירויות שבין 0.01 הרץ ועד 10 הרץ ובתחום דינאמי של 140 ד"ב. בגלל תנאי הבידוד של הגלאי מרעשים והשפעות חיצוניות, תחנת ה-BB במצפה היא אחת התחנות הסיסמיות הרגישות בכדור הארץ. התחנה היא חלק ממערך בינלאומי של תחנות סיסמיות שהקים המכון הגיאופיסי של גרמניה (רשת GEOFON) באמצעותו מועברים נתוני התחנה באילת אל כל מוסדות המחקר הסיסמולוגי בעולם. תחנה זו היא גם חלק ממערך התחנות שמשמש את ארגון האמנה לאיסור ביצוע ניסויים גרעיניים (ארגון CTBT) ונתוניה מועברים במקביל אל המכון הגיאופיסי בלוד (וממנו באמצעות רשת GEOFON לעולם כולו) ואל מרכז הנתונים של ארגון ה-CTBT בינה דרך המרכז הישראלי, שמושב במרכז למחקר גרעיני - נחל שורק.

2. תחנת SP של רשת הסיסמומטרים של ישראל העוקבת אחר הפעילות הסיסמית בישראל וסביבה. אל המצפה מגיעים בשידור רדיו גם נתוני המדידה של תחנות סיסמיות סמוכות בהר ברך, רמות שגיא ותחנה ידנית ליד עקבה ומהמצפה מועברים הנתונים אל המרכז הסיסמולוגי של ישראל במכון הגיאופיסי.

נוחיות המדידה) והם נמדדים לרוב באמצעות איזון גיאומטרי (מאזנה ושתי אמות=לאטות). בשיטה זאת ניתן להשיג דיוק של כחצי מ"מ לק"מ איזון. כך גם קשורים שני מדי מפלס אלה באילת. אחת מהביקורות לפעילותן התקינה הוא קבלת נתונים זהים או דומים מאוד.

לאחרונה, עלתה המודעות לפעילותן של מדי המפלס. גם בשל הרגישות לתופעות אקלים גלובליות המשפיעות לכאורה על מפלס הים. מדברים למשל על עליה במפלס הים התיכון בקצב של כחצי ס"מ עד ס"מ לשנה. מכאן עולה החשיבות של קבלת נתונים אמינה ממכשירים אלה. המכשירים מותקנים לרוב בתוך צינור או מתקן אחר בחוף הים וקיימת האפשרות לשינויים בגובה במתקן עצמו עקב שקיעתו. בנוהל עבודה תקין כוללים גם בדיקות ליציבות המתקן עצמו והדבר מבוצע באמצעות איזון ושילוב של טכנולוגיות לוינים GPS.

עוד יצוין שבזמן רעידת האדמה באיזור אילת, נובמבר 1995, נרשמה תנודת הים במד המפלס שמותקן בנמל הצבאי. כצפוי, התנודה הייתה חזקה ובלתי שגרתית וניתן ללמוד ממנה, על אופי הרעידה.

פעילות סיסמולוגית במנהרת מחקר באילת

(נכתב ע"י דר' אבי שפירא)

המצפה הגיאופיסי של מכון ויצמן למדע על שם אדולפו בלוך נחנך בשנת 1969. המצפה הוקם בתרומת משפחת אדולפו בלוך מדרום אמריקה. המצפה ממוקם במערה חצובה באורך של 200 מטרים בתוך הר עמרם, כ 15 ק"מ צפונית לעיר אילת. את החציבה ביצעה חברה שויצרית יחד עם אנשי מכרות תמנע. מערכות המדידה שפעלו במצפה נתרמו על ידי המכון הגיאולוגי של ארה"ב ומוסדות אמריקאיים נוספים שראו במתקן אתר מתאים לביצוע מדידות סיסמיות רגישות. עם פתיחתו כלל המצפה את המערכות הבאות:

1. תחנה סיסמולוגית ובה 3 מערכות סיסמוגרפיות בשלושה תחומי מדידה: תחום זמני המחזור הקצרים (SP - Short Period) תחום זמני המחזור הארוכים (LP - Long Period) ותחום זמני המחזור המאד ארוכים (VLP - Very Long Period). בכל אחד מהתחומים פעלו שלושה סיסמומטרים בשלושה רכיבי מדידה: אנכי, צפון-דרום ומזרח-מערב.

2. מערכת למדידת מעוותים SM - Strain meter, שהתבססה על צינור קוורץ של 17 מטרים ומדדה העתקה אורכית בכיוונים צפון-דרום ומזרח מערב.

3. מערכת למדידת שיפועים, TM - Tilt meter, שמדדה הפרשי העתקה אנכית בין שתי נקודות הרחוקות 17 מטרים האחת מהשניה. מערכת אחת פעלה בכיוון צפון-דרום והשניה בכיוון מזרח-מערב. המערכת התבססה על חוק כלים שלובים כאשר החומר הנוזלי היה כספית.

במהלך שנת 2001 ישקיע המרכז למיפוי ישראל משאבים לשיפור המערך. היעד הוא לשפר את אמינות הפעילות הכוללת ולהגדיל יכולות כגון שינויים בקצב ההקלטה של הנתונים.

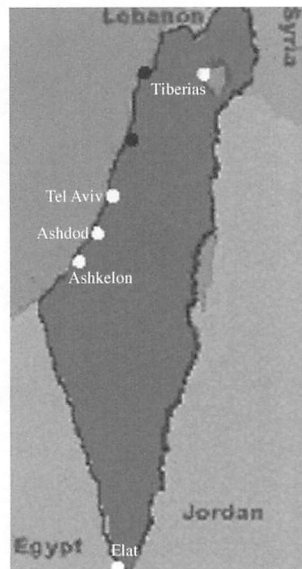
מדי מפלס באילת

באילת פועלים שני מדי מפלס. בנמל הצבאי פועל משנת 1962 מד מפלס של המרכז למיפוי ישראל.

משנת 2000 פועל במכון הבינאוניברסיטאי מד מפלס על בסיס שיתוף פעולה של חקר ימים ואגמים ושל המרכז למיפוי ישראל. היעד העיקרי של פעילותם הוא: מעקב רציף של מפלס הים והכנת בסיס נתונים שלו וביצוע עבודות ומחקרים המבוססים על הנתונים הני"ל.

מד המפלס בנמל הצבאי פועל על עקרון מיכני כאשר המצוף שנמצא בים מאוזן ע"י משקולת. תנועת הים האנכית מעלה ומורידה את המצוף לסרוגין ונרשמת באופן אנלוגי על דף נייר ובאופן ספרתי בזכרון המכשיר. למעשה, המכשיר במקורו מסוג מיכני ישן (חב' OTT גרמניה) שמחובר אליו מכשיר מודרני (גם של OTT). פעולת המכשיר אמינה ופשוטה. דיוק המדידה הבודדת (הרגעית הוא 1 ס"מ).

בציור נראים האתרים בהם נרשמת מפלס הים בישראל (נקודות שחורות של חקר ימים ואגמים).

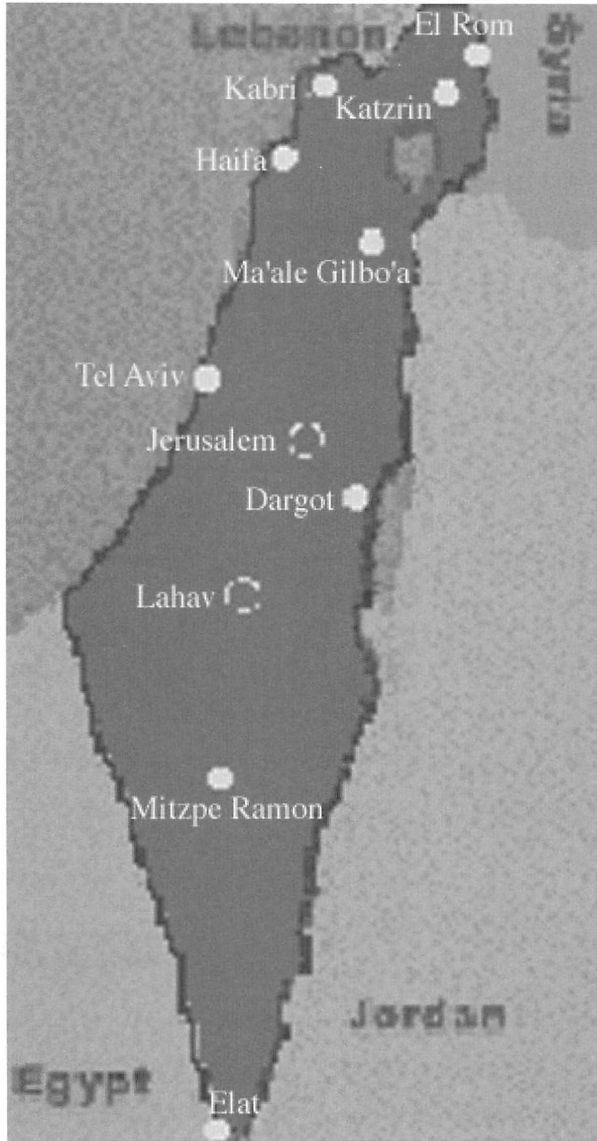


מד המפלס במכון הוא מסוג מד לחץ השקוע במים המתרגם את הפרשי לחץ המים לתנודות מפלס ים.

מערכת זאת קשורה לרשת האיזון הארצית. כידוע, רשת הבקרה הישראלית נחלקת לשניים. האופקית, והאנכית. נקודות הרשת האנכית פזורים לרוב לאורך כבישים וצירי דרכים (מטעמי

אלה משמשים לצרכים גיאודטיים וגיאודינמיים.

מפת אתרי GPS בארץ:





- יוסי מלצר¹, גרשון שטיינברג¹, בוריס שירמן¹, אבי שפירא², דב רוזן³
1. המרכז למיפוי ישראל
 2. המכון הגיאופיסי
 3. המכון לחקר ימים ואגמים

הבוא

באזור אילת קיימים מספר אתרים מדידה גיאודטיים וגיאופיסיים. בעיר אילת פועלת תחנת GPS קבועה (בביה"ס שדה אילת) משנת 1996. נתוני התחנה תורמים למחקר הגיאודימי בישראל כמו לפעילות הגיאודטית השוטפת. את נתוני התחנה אפשר למצוא מדי יום ביומו באתר המרכז באינטרנט. בישראל פועלות כיום 10 תחנות GPS באחריות המרכז למיפוי ישראל. במפרץ אילת פועלים שני מדי מפלס. האחד, פועל מזה 40 שנה וממוקם בנמל הצבאי. השני, פועל מזה שנתיים וממוקם במכון הבינאוניברסיטאי. מתקנים אלה מודדים באופן רציף את מפלס למטרות גיאודטיות ומחקריות. בים התיכון פועלים 5 תחנות מדי מפלס נוספות: חיפה, חדרה, ת"א, אשדוד, אשקלון. מצפון לאילת, סמוך לעמודי עמרם, קיימת מנהרת מחקר שנחפרה בשנות ה-60. לצד הציוד הסיסמולוגי של המכון הגיאופיסי, מותקן במקום ציוד גיאומגנטי למדידת השדה המגנטי. נתונים אלה יחד עם נתונים מגנטיים ממצפה מגנטי אמציה (סמוך לקרית גת) מאפשרים לקבל את השינויים וגודל השדה המגנטי בשטח ישראל.

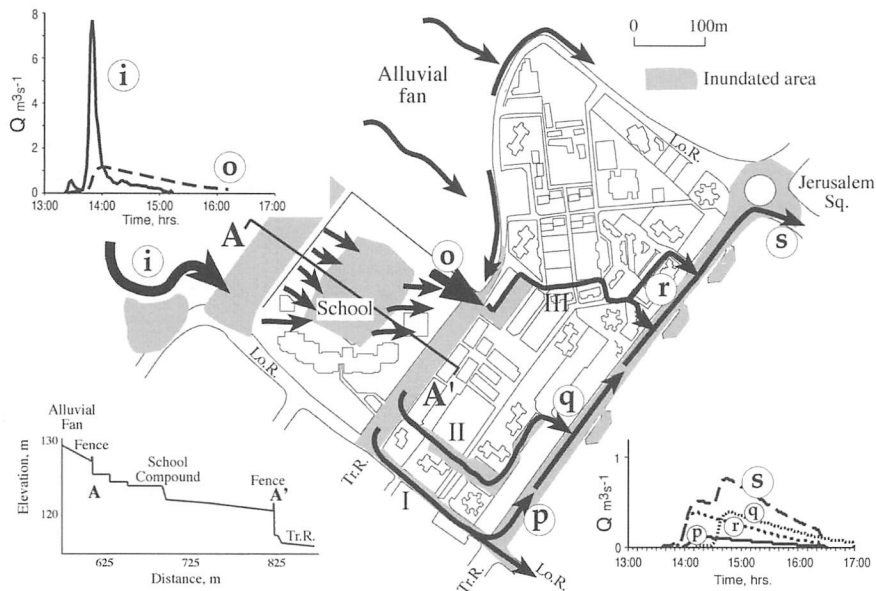
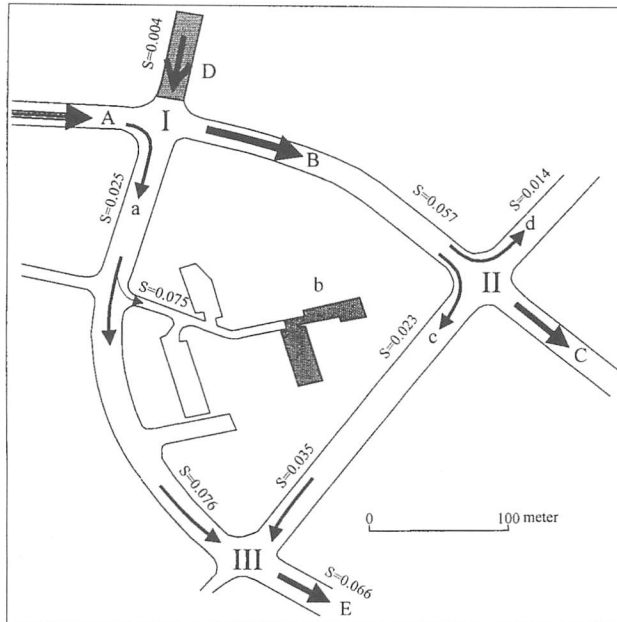
גבול ישראל מצרים מסומן באמצעות עמודי גבול מאזור רפיח בצפון עד טאבה בדרום. עמודים אלה הוצבו לאחר תהליך ארוך של קביעה, סימון ותייעוד קו הגבול בין שתי המדינות. בדינו וועדת הגבולות ניתן משקל רב לעבודת צוותי המודדים. שלבי העבודה היו איסוף חומר על קו הגבול המנטורי משנת 1906 (סומן ע"י הטורקים), איתור עמודי הגבול הישנים, מו"מ על נקודות המחלוקת, תהליך בוררות, סימון הגבול באמצעות אבני גבול חדשים ותייעודו באמצעות GPS.

תחנת ה-GPS באילת פועלת משנת 1996 ברציפות. היא מהווה חלק ממערך תחנות הקבע בישראל

תחנת GPS באילת

שהוקמו לראשונה ע"י המרכז למיפוי ישראל. מאוחר יותר, התפתחה הרשת במסגרת מחקר ושת"פ בין המרכז למיפוי ישראל, אונ' ת"א, סוכנות החלל הישראלית, המכון הגיאולוגי, מכון סקרפס ארה"ב. כיום מונה רשת זו 10 תחנות: קצרין, אלרום, כברי, מעלה גלבו, חיפה, ת"א, מעלה דרגות, להב, מצפה רמון, אילת. המקלטים המותקנים באתרים אלה קולטים ברציפות את אותות לווני ה-GPS ונתונים אלה מועברים לאתר מחקר ואתר אונ' ת"א באינטרנט. נתונים

איור 8. דוגמה להתנהגות הזרימה בצומת דרכים בעיר אילת: I - צומת אליה מגיע זרימה מדרך יותם A; זרימה שמקורה בעיר ושיטפון מרכז שחמון D, הזרימה מתפצלת לכיוון עקרי B ומשני (a). II - פיצול הזרימה בצומת שלשה כיוונים, (c) ו (d) C. III - כתוצאה מכך מתמתנת הזרימה בכיוון הסימנט הראשי, C. בצומת III מתרחש תהליך דומה.

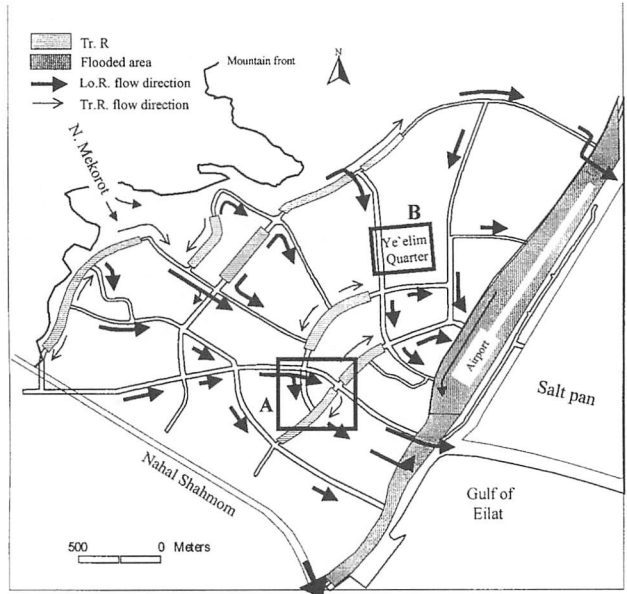


איור 9) מהלך הזרימה באירוע 18 באוקטובר 1997 בעיר אילת: i - כניסת השיטפון ממניפת הסחף אל מתחם בית ספר ומגוש כדורגל; o - מוצא הזרימה אל כביש רחב מפלס Tr.R; פיצול הזרימה לכביש אורך בשפוע ניכר Lo.R. ושני נתיבים בין בתי המגורים II, III; s, q, r, p - הספיקות המוקטנות במודל; A-A', חתך לאורך נתיב הזרימה.

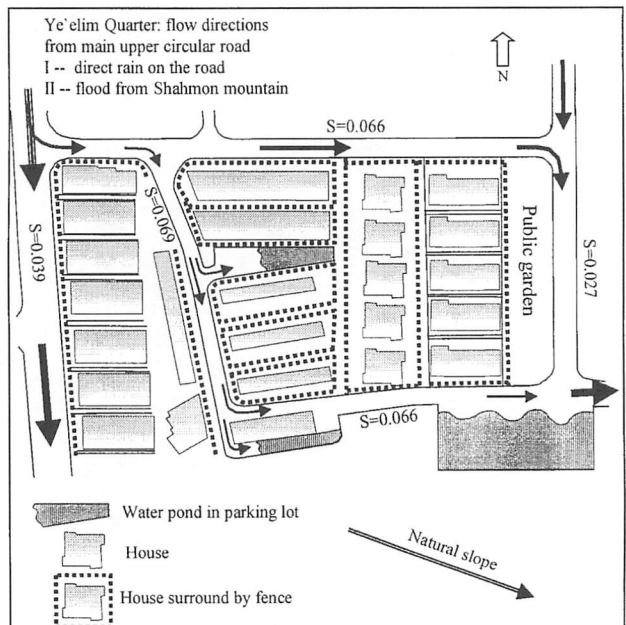
תחנה א גבעת הבונקרים -תצפית על מרחב העיר אילת

(איורים 6-9)

איור 6. נתיבי זרימה בעיר אילת בעת שיטפונות שמקורם באזור ההררי. מערכת כבישים אורטוגונלית (Road Tr.R - Transverse) בשיפוע נמוך, מוצפת וממתנת את התקדמות הלמיטפון למורד. חצים דקים מסמנים את כיוון הזרימה מכביש הרחוב. כבישי האורך (Lo.R - Longitudinal oad) מהמעלה למורד מעבירים את הזרימה למורד. החצים העבים לאורך מערכת זו מסמלים את כיוון הזרימה בשיפועים גבוהים - 4-7%. אזור ההצפה מתחיל בקו המגע בין מניפת הסחף למלחה בעקבות שיפוע נמוך וניקוז לקוי. A - תיאור מפורט של סיבנט אחד המתאר את מהלך הזרימה באיור 8; B - התנהגות שכונת מנורים במהלך גשם ישר ושיטפון החודר לשכונה מהאזור ההררי - איור 7.



איור 7. התנהגות הזרימה בתוך שכונת יעלים כתוצאה מגשם מקומי ושיטפון הנכנס מהאזור ההררי. גנות, חצרות ואזורי חניה ללא ניקוז, אונמים את מרבית הנגר שנוצר כתוצאה מגשם ישר. נגר עילי מתפתח רק על הכבישים. שיטפון שמקורו בהרים, חודר לשכונה מהמעלה וחלקו מתפצל למספר נתיבים. חלק מהשיטפון נאגם באוגרים מקומיים.



Gilbert, 1877

"... העמקים הנם בית הקיבול של הסדימנט שנשטף החוצה מההרים, הכוללים סדרה של חרוטי סחף במרחק פסיעה ממורדות ההרים. מכל קניון מסופקת הבליה אל העמק, האפיק המוביל, בונה כלפי מעלה את פני האפיק עד אשר הוא גבוהה יותר מפני השטח הסמוכים ואז נעזב ועל ידו והמחזוריות של התהליך ממלאת סחף בצורת חרוט אשר השיפוע שלו שווה בכל הכיוונים ממוצא הקניון. בזמן זה או אחר, המים זורמים בכל חלק של החרוט ועוזבים כל חלק ממנו".

Dutton 1880

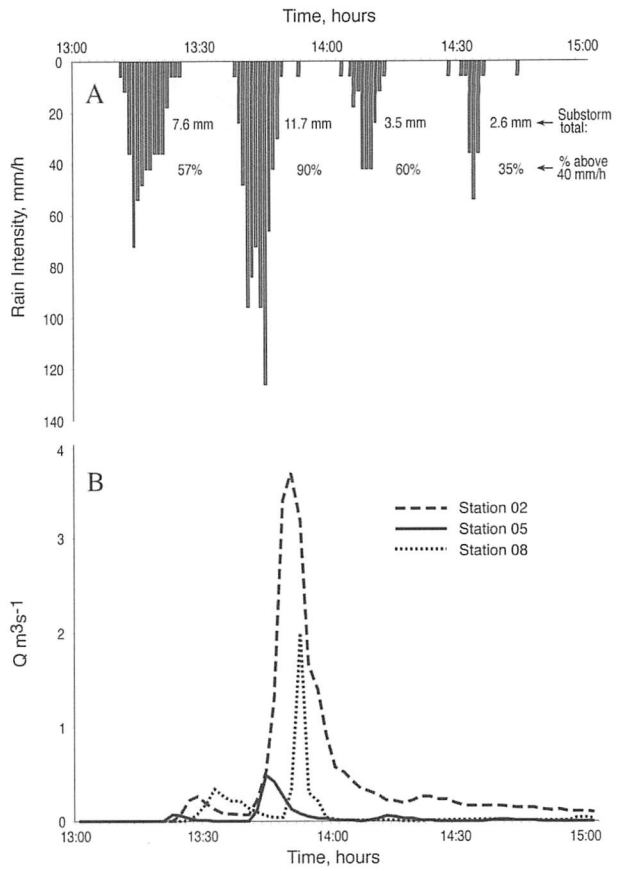
"... תדירות החזרה של השינוי (בנתיב הזרימה), גורמת לנתיב הזרימה לרטוט באופן דיאלטי סביב השער, כמרכז. במשך תקופת זמן (ארוכה) הוא בונה חצי חרוט, שקודקודו הוא השער. התנודות אינן אחידות אלא דומות למחוג של מצפן בסופה מגנטית. אבל בטווח זמן ארוך ולאחר מספר רב של הסטות, הנחל יסרוק על פני חצי העיגול, עם תוצאות אחידות ושוות בקירוב. מבנה זה הוא 'חרוט אלוביאלי'".

Dawdy, 1979

"שיטפון המתרחש על פני מניפת סחף או פני שטח דומים אשר מתהווה בקודקוד המניפה ומאופיין על ידי מהירות זרימה גבוהה, תהליכים אקטיביים של ארוזיה, הסעת סדימנט והשקעה ומסלולי זרימה שלא ניתנים לחיזוי".

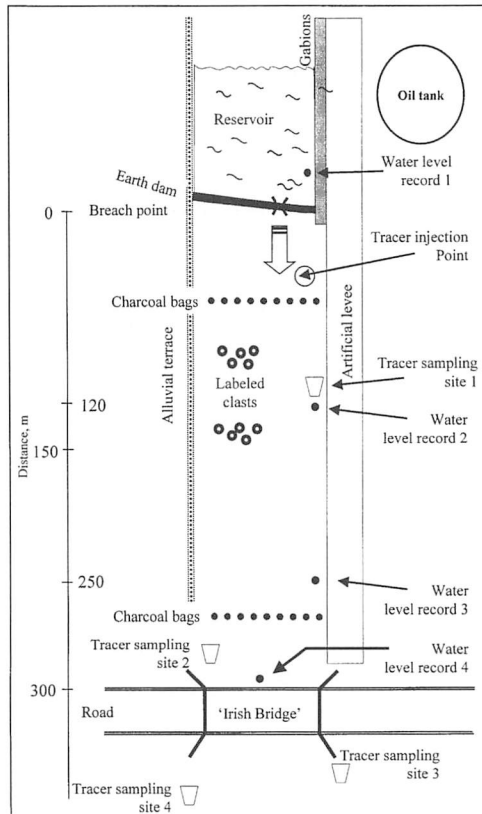
NRC, 1996

"השקעת סדימנט בשבר טופוגרפי (שינוי טופוגרפי פתאומי) - כמו למשל בסיס חזית ההרים, Escarpment, וצידי עמקים - המורכב מסדימנט פלוביאלי או Debris flows בעל צורת מניפה שלמה או חלקית"

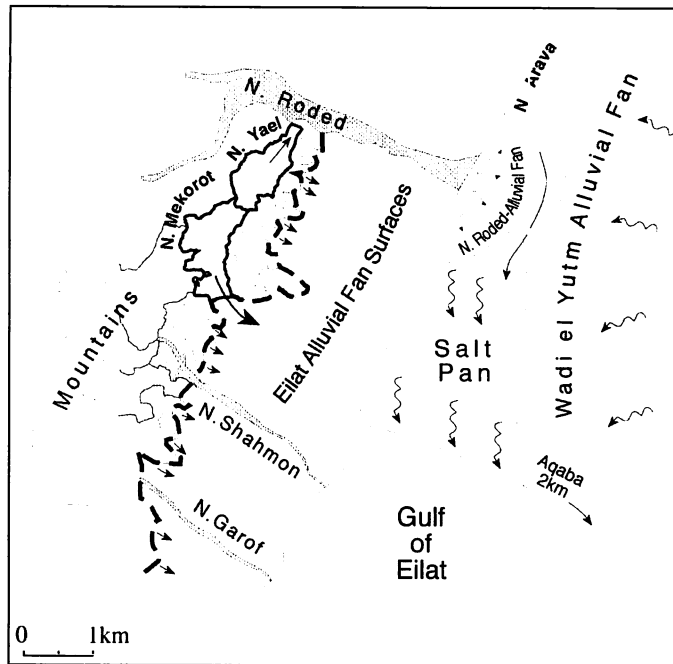


איור 24. מאפייני הרימה בשיטפון
אוקטובר 1997: פרקי הגשם
והידרוגרפים במחל יעל

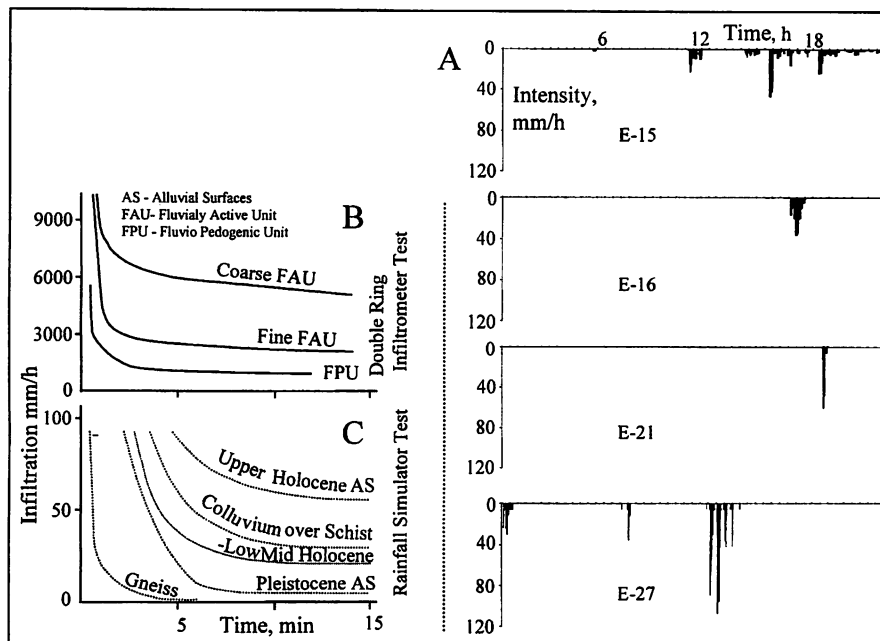
איור 5. תבנית הניסוי באתר חברת
החשמל במחל שחמון.



איור 3. המערכת
ההידרולוגית הטבעית
במרחב העיר אילת
בתקופה שקדמה לתחילת
ההתיישבות



תחנה 1 תחנת משנה חברת החשמל בנחל שחמון (איורים 4-5)

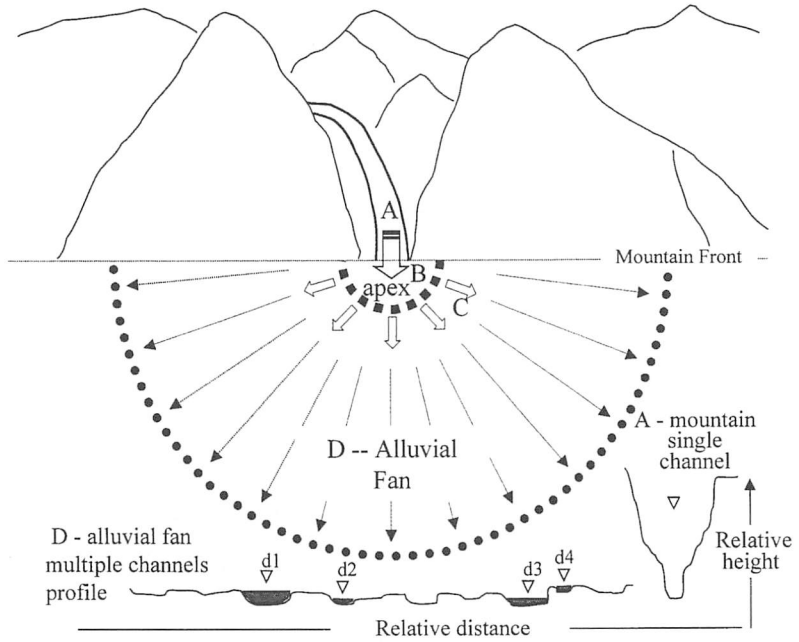


איור 4א. הוצרות שיטפון מדברי בהשוואה לאזורי אקלים אחרים: מאפייני גשם, פני השטח ואפיקים. A השוואה בין 4 סופות גשם בעלות מאפיינים שונים בנחל יעל; B מאפייני חידור באפיק הפעיל של הנחל; C על פני מפלסים שונים באגן ההקוות (בריבאום, 1986).

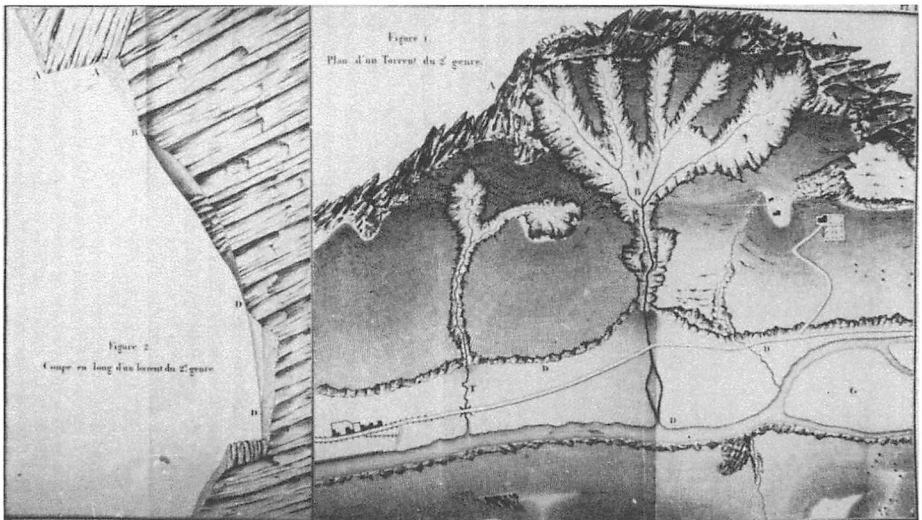
From **single** & high energy channel (A) to **multiple shallow** channels (D)

- A - mountain confined channel
- B - apex -- debris & fluvial flows; extreme flow attenuation and sedimentation
- C - zone of beginning of new flow routs
- D - parallel shallow channels, the number of channels depends on the flood magnitude

Variation in flood magnitude will cause:
 change of water level in the mountainous channel;
 change in the number of active channels on the alluvial fan



איור 1. התהליכים המתרחשים על פני מניפות סחף פעילות



איור 2. איור של (1841), Surell, -- מניפת סחף באלפים הצרפתים

העיר אילת ממוקמת על סדרה של מניפות סחף קטנות למרגלות חזית ההרים. עד הקמתה, בשנת 1949, התפרסה הזרימה השטפונית מן ההרים על פני המניפות תוך כדי השקעת סחף שהגיע לעיתים עד למליחת אילת. מאז עבר האזור תהליך של שינוי קיצוני - מעיירה שולית שכלכלתה מבוססת על נמל ומכרות נחושת לפיתוח מואץ כאזור תיירות מרכזי. המרקם העירוני תופס כיום את מרבית שיטחן של מניפות הסחף ואילו אזור התיירות העיקרי, הכולל את שדה התעופה נמצא על פני מליחת אילת.

משטר הגשם, השיטפונות והשפעתם על המרחב האורבני נבחנו מאז הקמתה של העיר. שני גורמים נמרים ממאפייני הגשם והנגר המדבריים מכתיבים את האופי המיוחד של התנהגות המרחב האורבני:

א) סופות הגשם על העיר עצמה -- מאז הקמתה של אילת ועד היום ניבנו מערכות ניקוז שנועדו לטיפול בנגר שמקורו בגשם על העיר בלבד. כתוצאה משנים מעוטות משקעים ומכמות גשם זעומה בכל פרק גשם, לא הוקדשה תשומת לב לתחזוקה של מערכות ניקוז אלה. אבק ופסולת סותמים את ניקוז הגגות וחצרות הבתים מוקפות דר ללא פתחי ניקוז פעילים. גם נקזי הכבישים נסתמים הן מאבק ופסולת והן משיטפונות המגיעים מהמעלה אל העיר והנושאים עמם סחף.

ב) שיטפונות המגיעים אל העיר מהמעלה - אי ביצוע של תוכניות למערכות הגנה מפני שיטפונות, גרמו לכניסת הזרימות אל תוככי המרחב העירוני. אולם, התשתית העירונית הכוללת נתיבי תחבורה, שבילים, אזורי חניה, אזורים פתוחים כגני משחקים ופרקים, יוצרת אי רציפות בתמסורת, פיצול נתיבי הזרימה, הקטנת מהירותה ואיגום מים באזורים מקומיים זעירים.

שיטפון שהתרחש באוקטובר 1997 הדגים שחוסר התכנון העירוני, מבחינת ההגנה הקלאסית המקובלת מפני שיטפונות, גרם במקרה של העיר אילת לתוצאה הפוכה מהמצופה - הגשם המקומי נקלט כולו באזורים העירוניים, ואילו הזרימה השיטפונית המרוכזת התפצלה והתמתנה בתוך המרחב העירוני עם כניסתה אליו (איור 9).

מהניסיון שהצטבר בעיר אילת נראה, שיישום עקרונות תכנון הרגישים לעניין השיטפונות הנו אלטרנטיבה סבירה למערכת הגנה 'מוחלטת', תוך חיקוי אופן התרחשותם של התהליכים הטבעיים על פני מניפות סחף. אזור חיץ מתוכנן היטב בין האזור הטבעי לעיר, בו משולבים כבישים, אזורי חניה ומרחבים פתוחים, יוצר אי רציפות, פיצול והתמתנות הזרימה, שמשמעותם זרימה נשלטת ובלתי מזיקה.



המבנה הטופוגרפי הנוח של מניפות סחף הנו מוקד משיכה לפעילות אנושית -- התיישבות, תחבורה, חקלאות ועוד. פיתוח אורבני 'קלאסי' על פני המניפות מהווה ניגוד חריף לתהליכים הטבעיים של שינויים לא חזויים במסלול נתיבי הזרימה והשקעת סחף, שאינם בהכרח תואמים מערכת ניקוז עירונית קבועה.

ההיסטוריה של ההתיישבות על פני מניפות סחף באזורים לחים החלה לפני מאות בשנים באזורים ההרריים המיושבים שבאירופה. באלפים ובפירנאים לדוגמה, בנוף של מדרונות תלולים ועמקים קרחונים, נמצאו מניפות הסחף כאחד האזורים הבודדים שאפשרו הקמת מרקם יישובי עירוני. באזורים גשומים אלו פני השטח מכוסים ברובם בצמחיה והעדויות המשמעותיות ביותר לרמת הסיכון לפעילות אנושית טמונה בסוג שימושי הקרקע של המתיישבים, אשר מניסיונם ידעו להתאים את סוג הפעילות לרמת הסיכון. האזורים שבהם הוקמו היישובים כמעט שלא נחשפו לאירועים שיטפוניים ונחשבו לבטוחים יותר ובשאר האזורים נעשתה פעילות חקלאית בלבד. מניפות שיטפונות במיוחד נותרו נטושות לאורך השנים. למרבה האירוניה, דווקא אזורים אלו מועדפים כיום להתתיישבות בגלל היותם פנויים משימושי קרקע וזאת הסיבה להיותם חשופים לסיכון גבוה בפני שיטפונות תדירים. בספרד, בהרי הפירנאים, מניפות הסחף אינן מוגדרות כאזור שונה מכל פני שטח אחרים בהתייחסות לסיכונים טבעיים. כתוצאה מכך, מניפת סחף פעילה אשר תועדו אודותיה מספר אירועים שיטפוניים חזקים מאז תחילת המאה, יושבה בשנת 1989 ואירוע שיטפון ב 1996 גרם למותם של 86 איש. האירוע יוחס כ 'אסון טבע' שלא ניתן היה להימנע ממנו אך ורק בגלל שתפיסת התכנון נעשתה כמקובל באזורי פשט ההצפה של נחלים מבלי שניתנה הדעת לאופי השונה של הסיכונים הקיימים על פני מניפות סחף.

לעומת היסטוריה רצופה של התיישבות אינטנסיבית באזורים לחים, באזורי מדבר נעו שבטי נוודים והתיישבויות נקודתיות שהתקיימו תקופות קצרות. רבו המכריע של השטח המדברי נשאר ללא מגע יד אדם. רק בעשורים האחרונים החלה התפשטות במגמות ההתיישבות באזורי המדבר ככלל ועל פני מניפות הסחף בפרט, אשר נמצאו מועדפות טופוגרפית. האקלים הצחיח האפיזודות הנדירות של שיטפונות על רקע של שנים ללא גשם, לא המחישו את הסכנות הקיימות בשיטפונות המדבריים. כצפוי, בד בבד עם הגידול המואץ בשטחי ההתיישבות החלו להצטבר עדויות על פגיעות מקומיות כתוצאה משיטפונות והשקעת סחף.

- י' אייל, "ההיסטוריה המטמורפית והסטרוקטורלית של המאסיב הפריקמברי באזור טבא וביר צויר", חיבור לקבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים (1976).
- י' אייל, "ההיסטוריה המטמורפית והסטרוקטורלית של אזור ואדי טויבה - ואדי אם מע'רה צפון-מזרח סיני", ספר סיני, "ארץ" (1987).
- י' אייל, מ' אייל, א' יסטרוב, "סיור לגרננים באזור אילת", מדריך לסיורים גיאולוגיים באזור אילת, החברה הגיאולוגית הישראלית (1990).
- מ' אייל, "שלבים בהיסטוריה המגנטית של המסיב הפריקמברי בסיני ובנגב הדרומי", חיבור לקבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים (1975).
- מ' אייל, י' אייל, ס' פלץ, "המגנטיזם הפריקמברי באזור אילת", מדריך לסיורים גיאולוגיים באזור אילת, החברה הגיאולוגית הישראלית (1990).
- מ' אייל, י' ברטוב, א. שמרון, י' ק' בן תור, "הגיאולוגיה של סיני", המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI/85 (1985).
- מ' בילסקי, "שלבים בהתפתחות המאסיב הערבו-מבי בסיני", חיבור לקבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים (1982).
- צ' גרפונקל, "הטקטוניקה של השוליים המערביים של הערבה הדרומית", חיבור לקבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים (1970).
- צ' גרפונקל, "הטקטוניקה של מפרץ אילת", מדע, כ"ו, 6 (1982).
- צ' גרפונקל, "הגיאולוגיה של סיני לאור טקטוניקת הלוחות", ספר סיני, "ארץ" (1987).
- י' דרוקמן, ט' ויסברוד, צ' גרפונקל "מפה גיאולוגית - יטבתה ואילת", המכון הגיאולוגי (1993).
- ט' ויסברוד, ר' בוגוש, "סידרה וולקנו-סדימנטרית פריקמברית ועורקי בריט-פלואורית-קלציט במאסיב חוד", מדריך לסיורים גיאולוגיים באזור אילת, החברה הגיאולוגית הישראלית (1990).
- א' שמרון, "המבנה הפריקמברי וההיסטוריה המטמורפית של אזור אילת", חיבור לקבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים (תקציר בעברית) (1972).

תמונה 11: קונגלומרט אילת. זהו סלע המורכב מחלוקים של סלעי התשתית הנתונים במטריקס של ארקוזה או חומר געשי. אין בו חלוקים של סלעי משקע. סלע זה, המשתייך לשלב הגעשי-קונגלומרטי, נוצר במהלך התרוממות שרשרת ההרים מתוצרי הסחיפה של סלעי השילד. חלוקי



גרניט בתוכו מעידים כי סלעים המתגבשים בעומק כבר נחשפו באותה עת. (ש.ש. או"פ).

4 תחנות רחבעם תצפית בנחל

תמונה 12: תצפית לעבר סיני וג'בל אום-ותד. בתצפית ממעלה גשרון לעבר סיני נראים גושים הערוכים במבנה של שברי מדרגות. באופק נראים סלעי המשקע של ג'בל אום-ותד בסיני. בפסגת הגוש הרחוק נראה מישור הגידוע (הפנפליין) של השילד הערבו-נובי. בגוש הקרוב נחשפת תצורת תמונע מתור הקמבריום. מתחתיה קיימת שכבה דקה של תצורת עמודי שלמה אשר הורבדה מעל מישור הגידוע. (ש.ש. או"פ).

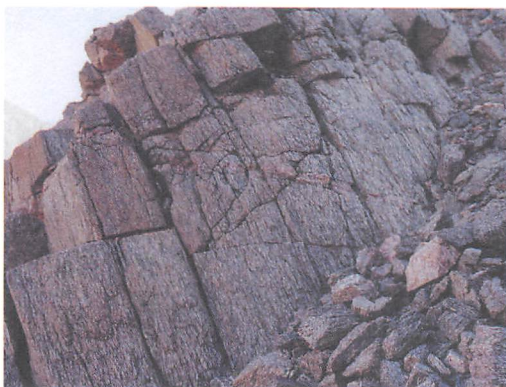


תמונה 13: קער רחבעם. סלעי המשקע קומטו כאן למבנה של קער (סינקלינה) בלתי סימטרי. נחשפות תצורות סיירים וע'רב מתקופת הסנון, טקיה מהפליאוקן וצרעה מהאיאוקן. בפסגה מונח באי-התאמה קונגלומרט רחם מתקופת המיוקן שבו חלוקים של סלעי

משקע בלבד (באותה עת, טרם חשפה ההתחזרות סלעי תשתית בפני השטח). סלעי משקע נשתמחו כאן בתוך גרובן שלמה. הם קומטו בשל התקצרות השכבות בגוש שידד בין השברים. (ש.ש. או"פ).



תמונה 8: דייק חומצי. נראה דייק (אדמדם) החוצה את סלעי התשתית. הדייקים החומציים חדרו בשלבים אחרונים של פעילות האורוגן. הם חדרו למערכות סידוק שנוצרו תוך התרוממות שרשרת ההרים. בהר שלמה חדרו לגרניט אילת דייקים חומציים כה רבים, שהם מהווים את עיקר הנפח ויוצרים "ארץ דייקים". דייקים אלה חוצים אף עורקי פגמטיט, עדות כי הם צעירים יותר. (ש.ש. או"פ).



3 תחנות תצפית בנחל שלמה

תמונה 9: גנייס טבה. בסלע ניכרת היערכות כיוונית ברורה של המינרלים במבנה קווי-רצועתי (lineation) או גנייסי (gneissosity). הרכבו הדיוריטי של הסלע מעיד כי מקורו בסלע מגמטי פלוטוני שעבר התמרה. הגוף הפלוטוני חדר אל צפחות אילת והתמצק בעומק בעוד ההתמרה נמשכת ולכן הסלע המגמטי הותמר לסלע גנייס. (ש.ש. או"פ).



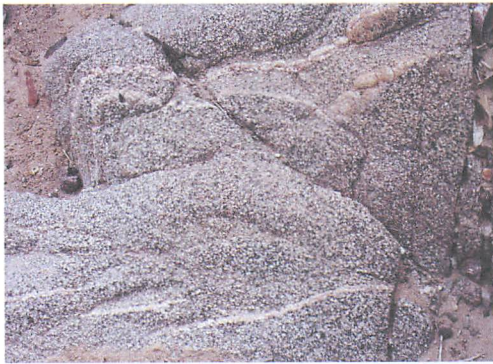
תמונה 10: סלעי הר געש קדום. נראים זרמים של לבה בהרכב חומצי - ריוליטי. הסלע הגעשי העיקרי הנו איגנמברית (טוף געשי מולחם). פעילות געשית זו התרחשה לקראת תום עידן

הפריקמבריום, במהלך התרוממות שרשרת ההרים. במקביל לה התקיימו תהליכי סחיפה שהותירו סלעים וולקנו-סדימנטריים. (השלב ה"געשי-קונגולומרטי"). (ש.ש. או"פ).

תחנות תצפית בנחל נטפים



תמונה 5: מיגמטיט רווד. בסלע מיגמטיטי זה מבחינים ברצועות של ציפחה ושל גרניט לחלופין. אחת הדרכים להיווצרות מיגמטיט היא בתנאי התמרה קיצוניים בהם מתרחשת התכה חלקית בטמפרטורה גבוהה. בהתכה חלקית כזו נאספת ומתגבשת המגמה לסלע גרניטי (חסר היערכות כיוונית של המינרלים) בינות הותכו. (ש.ש. או"פ).

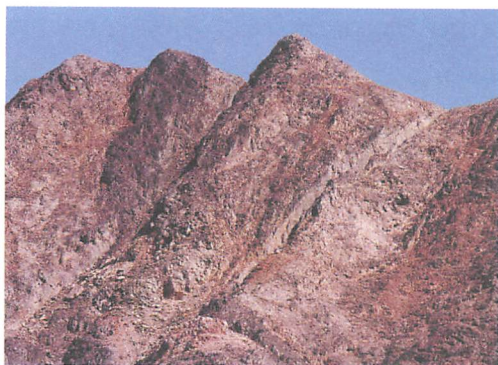


תמונה 6: קוורץ דיורטי רווד. זהו סלע מגמטי המראה מעט סימני מעוות, המתבטאים בגנייסיות קלה ובהתארכות הקסנוליתים שחדרו לתוכו. נראה כי סלע זה נוצר בתום שלב ההתמרה והושפע מעט מסיום המעוות האחרון. יש הסבורים כי מקור סלע זה בהתכה חלקית שגרמה להיווצרות מיגמטיט רווד. חלק מהנתך נפרד מהמיגמטיט והמגמה שהצטברה התגבשה לגוף זה. (ש.ש. או"פ).



תמונה 7: גרניט אילת. זהו סלע מגמטי שחדר אל סלעי הסביבה לאחר שנסתיימו תהליכי ההתמרה. הוא נוצר

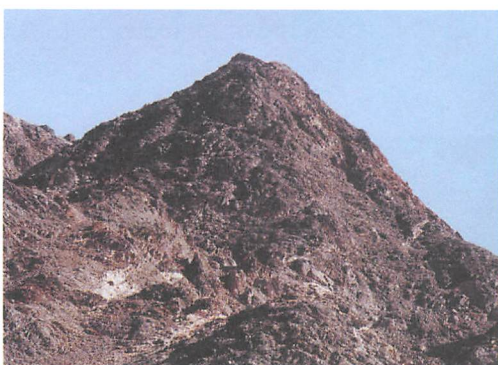
בשרשרת ההרים בשלב שבו התרחשו חדירות עמוקות. לעומתו גרניט יהושפט נוצר בשלב של חדירות דודות. מאחר שגרניט אילת וגרניט יהושפט מופעים במגע זה עם זה יש להניח כי בין שלבי חדירתם חלה סחיפה והסרה ניכרת של פסגת שרשרת ההרים. (ש.ש. או"פ).



תמונה 2: גנייס-גרניט אילת. ההרכב הגרניטי של הגנייס מעיד כי מקורו בסלע מגמטי גרניטי שעבר התמרה. ההתמרה גרמה להיערכות כיוונית של המינרלים בסלע, אם כי לרוב באופן חלקי. הגוף הפלוטוני חדר אל צפחות אילת והתמצק בעומק בעוד ההתמרה נמשכת ולכן הסלע המגמטי הותמר לסלע גנייס.



תמונה 3: דייק ציפחתי. נראה 'דייק שלילי' החוצה את סלעי גנייס-גרניט אילת. מבט מקרוב מגלה כי דייק זה בנוי מסלע ציפחה. במקורו היה הדייק מורכב מסלע מגמטי שחדר אל סלעי הסביבה. התמשכות תהליכי המעוות לאחר התמצקות הדייק הפכו את הסלע המגמטי לסלע מותמר. (ש.ש. או'פ).



תמונה 4: מטא-גברו ומטא-דיורית שחמון. עיקר הר שחמון בנוי מסלע מותמר, שחור-ירקרק, עתיר אמפיבול, המכונה "אמפיבוליט שחמון". אף שזהו סלע מותמר היערכות הכיוונית של המינרלים בו גרועה. הרכבו המינרלי מעיד כי מקורו בגופי חדירה מגמטיים בהרכב גברו ודיורית שחדרו אל סלעי הסביבה. התמשכות תהליכי המעוות לאחר התמצקות גופים אלה הפכו את הסלע המגמטי לסלע מותמר. (ש.ש. או'פ).

סדימנטריים (השלב ה"גנשי-קונגלומרטי"). שלב זה מיוצג עי-ידי קונגלומרט אילת (תמונה 11) שנשתמר בשקעים סקטוניים וסחיפתיים. הפעילות האורוגנית הסתיימה עם תום עידן הפריקמבריום. הסחיפה הנמרצת של שרשרת ההרים גרמה לבסוף להיווצרות מישור גידוע (פנפליין) (תמונה 12). זהו מישור גידוע חלק למדי בגג השילד הערבו-נובי המשתרע בשטח עצום. באותה עת, נחשפו בפני השטח סלעים מותמרים ומגמטיים, שנוצרו במקורם בעומק של 5-10 קילומטרים ויותר מתחת לפני השטח. על מישור הגידוע הורבדו החל מתור הקמבריום סלעי המשקע.

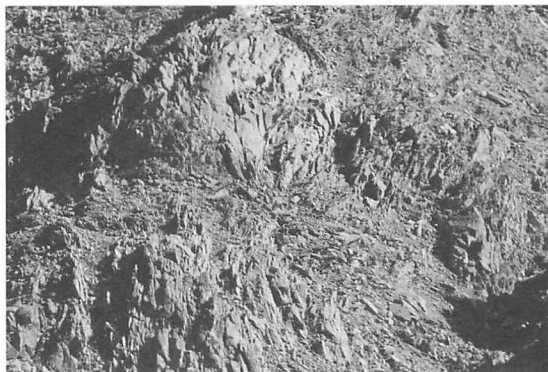
סלעי השילד ויחידות סלעי המשקע שהורבדו מעליהם נחשפים כיום באזורים שהתרוממו ועברו סחיפה חריפה ושבירה (תמונה 13). תהליכי חשיפה אלה פעלו באזור אילת במהלך עשרים מליון השנים האחרונות, כתוצאה מהתרוממות האזור והיווצרות בקע-ים המלח.

תחנות התצפית בסיור

תחנות התצפית בסיור מוצגות להלן בתמונות. סדר התצפית מותאם לסדר התחנות בשדה, ב"קמפוס אילת", בנחל נטפים, בנחל שלמה ובנחל רחבעם.

תחנות תצפית ב"קמפוס אילת"

תמונה 1: צפחות אילת. הן הסלע המותמר הקדום ביותר הנחשף באזור אילת. באזור "הכיפה התרמלית" מצויים בצפחות אלה גבישים גדולים של גרנט, סטאורוליט, קורדיאריט ואנדלוזיט המעידים על התמרה בטמפרטורה מעל 600°C ובלחץ מעל 3 קילובר (כדי 10 ק"מ עומק). בודינים (boudins) וקריןולציות בצפחות אלה נוצרו בתהליכי המעוות (ש.ש. או"פ).



וטופים. תוצרי הבלייה של הסלעים הגעשיים הובלו אל התהום האוקיינית והצטברו בסדרות עבות. כתוצאה מנחיתתם לעומק בתהליכי הפחתה הם הפכו לסלעים מותמרים. שלב זה מיוצג באזור אילת על-ידי צפחות אילת (תמונה 1). תהליכי ההתמרה כללו מספר אירועים עוקבים של מעוות אשר הותירו את רישומם במרקם של הצפחות. סלעי גופים מגמטיים שחדרו לסלעים המותמרים והתמצקו בעוד ההתמרה נמשכת הותמרו לגניסיים, כדוגמת גנייס-גרניט אילת (תמונה 2) וגנייס טבה (תמונה 9).

בשלב מאוחר יותר, לפני כ-650 מיליון שנים, נסגרו קשתות האיים. התהליך לווה בשלב מעוות והתמרה נוסף והסלעים שבנו את קשתות האיים עצמם הותמרו גם הם. שלב זה מיוצג באזור אילת על-ידי סלעים מגמטיים שהותמרו, הכוללים את ה"דייקים הציפחתיים (תמונה 3) ואת "מטא-גברו ומטא-דיורט שחמון (אמפיבוליט שחמון) (תמונה 4). באזור אילת חסר ייצוג לסלעים מותמרים שמקורם בסלעי קשת האיים עצמה.

בשלב הבא התרוממה באזור ההפחתה שרשרת הרים. שרשרת ההרים של סוף הפריקמבריום השתרעה על פני שטחים נרחבים בסעודיה, במצרים ובסודן. חדירות גרניטיות רבות היקף שהתרחשו בשלב זה גרמו להיווצרות קרום יבשתי גרניטי וליתוספרה יבשתית. השלבים המוקדמים מיוצגים על ידי סלעים מגמטיים המראים מעט סימני מעוות, כדוגמת קוורץ דיורט רווד (תמונה 6). יש הסבורים כי מקורו של קוורץ דיורט רווד בהתכה חלקית שגרמה להיווצרות מיגמטיט רווד (תמונה 5). השלבים המאוחרים מיוצגים על ידי סלעים מגמטיים שחדרו לאחר שנסתיימו תהליכי ההתמרה. החדירות המגמטיות התרחשו במהלך בשני שלבים: קלק-אלקליני (calc-alkaline) ופר-אלקליני (per-alkaline). בשלב הקלק-אלקליני נוצרו סלעים מגמטיים בינוניים עד חומציים בהרכבם, המכילים סידן ומתכות אלקליות. הרכב זה בא לידי ביטוי בסלע בעושר בפלגיוקול המכיל סידן ונתרן בהרכבו ובמיעוט או היעדרות של פלדשפר אשלגני. שלב זה מיוצג באזור אילת על-ידי גרניט אילת (תמונה 7). בשלב הפר-אלקליני נוצרו סלעים מגמטיים חומציים בהרכבם, עשירים במתכות אלקליות ועניים בסידן. הרכב זה בא לידי ביטוי בסלע בעושר בפלדשפר אשלגני ובמיעוט או היעדרות של פלגיוקול המכיל סידן. פעילות מגמטית בהרכב זה אופיינית לגעשיות פנים יבשתית הניזונה ממגמה הקשורה בהתכת סלעי קרום יבשתי. שלב זה מיוצג באזור אילת על-ידי גרניט יהושפט. הסלעים הגעשיים של שלב זה מיוצגים על-ידי ריוליט ועל ידי איגנמברט (תמונה 10). בין השלב הקלק-אלקליני לשלב הפר-אלקליני חלה הרמה וסחיפה ניכרת של השילד. מאחר שגרניט אילת וגרניט יהושפט מופעים במגע זה עם זה יש להניח כי בין שלב חדירות העמוקות של גרניט אילת לשלב החדירות הרדודות של גרניט יהושפט התרחשה הסרה ניכרת של פסגת שרשרת ההרים (כ-7 קילומטרים לערך).

בעת ההתרוממות נוצרו מערכות סידוק לתוכם חדרו דייקים שתפוצתם נרחבת (תמונה 8). על שרשרת ההרים התרחשה פעילות געשית בת בבת עם תהליכי סחיפה שהותירו סלעים וולקנו-



בסיור מודגמת גישה חדשה המשלבת סיור גיאולוגי לימודי בשדה יחד עם אתר בתמונות צבע באינטרנט. מטרת האתר להקנות לסטודנטים רקע לסיור. לכל תחנת תצפית בשדה מובאת באתר תמונה צבע מייצגת והסברים לה. המגמה היא שהאתר יקנה לסטודנט כלים לעריכת סיור גיאולוגי בהדרכה עצמית. יתרון האתר, בהיזון חוזר לאחר הסיור ובביסוס המידע שרכש הסטודנט במהלכו. הסטודנט יכול לחזור לאתר ולהתרענן בנושאי הסיור בכול עת. גישה חדשה זו פותחת אופקים חדשים בלימודי הגיאולוגיה באוניברסיטה הפתוחה. אתר זה יחד עם אתר פארק מכתש-רמון הנם חלוצים בשורה של אתרים בתמונות שיהוו רקע לכל מסלולי הסיורים בגיאולוגיה של האוניברסיטה הפתוחה. השאיפה היא שאתרים אלה יעוררו עניין ויקנו תנופה להוראת הגיאולוגיה בארץ. לאתרים אלה מגיעים דרך מערכת תלם - תקשוב ללימוד מרחוק - של האוניברסיטה הפתוחה: <http://telem.openu.ac.il>

מטרת הסיור להציג שלבים בהתפתחות השילד הערבו-נובי כפי שהם באים לידי ביטוי

רקע גיאולוגי כללי לסיור

בסלעים המגמטיים והמותמרים הנחשפים באזור אילת. התפתחות השילד הערבו-נובי והיווצרות הסלעים המותמרים והמגמטיים באזור אילת היוו נושאים לעבודות מחקר רבות. סיכומים בעברית פורסמו על ידי: י' אייל (1976 ו-1987); י' אייל, מ' אייל, יסטרוב (1990); מ' אייל (1975); מ' אייל, י' אייל, פלץ (1990); מ' אייל, ברטוב, שמרון, בן תור (1985); בילסקי (1982); גרפונקל (1970, 1982 ו-1987); דרוקמן, ויסברוד, גרפונקל (1993); ויסברוד, בוגוש (1990); שמרון (1972). השילד הערבו-נובי נוצר בפעילות אורוגנית שהתרחשה בעידן הפריקמבריום. אירועי היווצרותו הקשורים בטקטוניקת לוחות קדומה החלו לפני כ- 900 מיליוני שנים והסתיימו לפני כ- 530 מיליוני שנים. פעילות אורוגנית רב שלבית הפכה את תשתית האזור מקרום אוקייני לקרום יבשתי. סבורים כי, לפני כמיליארד שנים לא הייתה קיימת כלל יבשה באזור, אלא קרקעית אוקיינית בזלתית ששרידיה חשופים כיום כאופיוליטים במקומות אחדים בסעודיה ובסודן. בשלב מוקדם, בפריקמבריום המאוחר, נוצר אזור הפחתה תוך-אוקייני שהתפתח על פני הקרום האוקייני עצמו. באזור ההפחתה נוצרו רצועות אחדות של קשתות איים ונערמו זרמים געשיים

- Evenari, M., Shanan, L., and Tadmor, N. 1982. *The Negev, The Challenge of a Desert*. Cambridge, MA: Harvard University.
- Frank, F. 1934. *Aus der Araba*. ZDPV 57:191-280.
- Gilat, A., M. Shirav, R. Bogoch, L. Halicz, U. Avner and D. Nahlieli. 1993. Significance of Gold Exploitation in the Early Islamic period, Israel. *JAS* 20:429-437.
- Ilani, S. 1987. Copper Mineralization in Sedimentary Cover Associated with Tectonic Elements and Volcanism in Israel. *Mineralium Deposita* 22:269-277,
- Rothenberg, B. 1972, *Timna*, London.
- Segal I, in press. Metallurgical Investigation of Copper and Sleg from Be'er Orah, In Avner, in press. Additional notes on the excavation at Be'er Orah. 'Atiqot.
- Sharon M., U. Avner and D. Nahlieli. 1996. An Early Muslim Mosque Near Be'er Ora in the Southern Negev: Possible Evidence for an Early Eastern Qiblah? 'Atiqot 30:107-114.
- Willies, L. 1990. Exploring the Ancient Copper Mines of the Wadi Amram (Southern Arabah). *IAM S*

על פי השרידים באתר, ועל פי אתרים דומים בחי'לאז ובמצרים עילית, ניתן להציע שחזור של תהליך ההפקה:

חומר הגלם אשר שימש, כנראה, להפקת הזהב היו עורקים ועדשות קוורץ אשר מצויים באזור הנחל, או חלוקים המורים מהם אשר לוקטו מתוך משקעי הוואדיות וטרסות הסחף. גושי הקוורץ נכתשו לחלקיקים קטנים על פני הסדנים, ולאחר מכן נטחנו לאבקה דקה באתרי המטחנות. אין בואדי טוואחין עדויות להמשך תהליך הפרדת הזהב אך ניתן לשחזרו על פי חיבור של אל-המדאני, סופר ערבי בן המאה ה' לספירה (בתרגום לאנגלית - Dunlop, 1957): תחילה פלוטאציה במים בכלי עץ (הרחקת המרכיבים הקלים ושקיעת חלקיקי הזהב הכבדים) וקבלת תרכיז מועשר בזהב. סביר להניח כי תהליך זה המצריך כמויות מים זמינות, בוצע בחוף הים. השלב האחרון בתהליך היה אלמגמטיציה של הזהב בעזרת כספית, תהליך שכבר היה ידוע זמן רב לפני התקופה האיסלמית.

ספרות

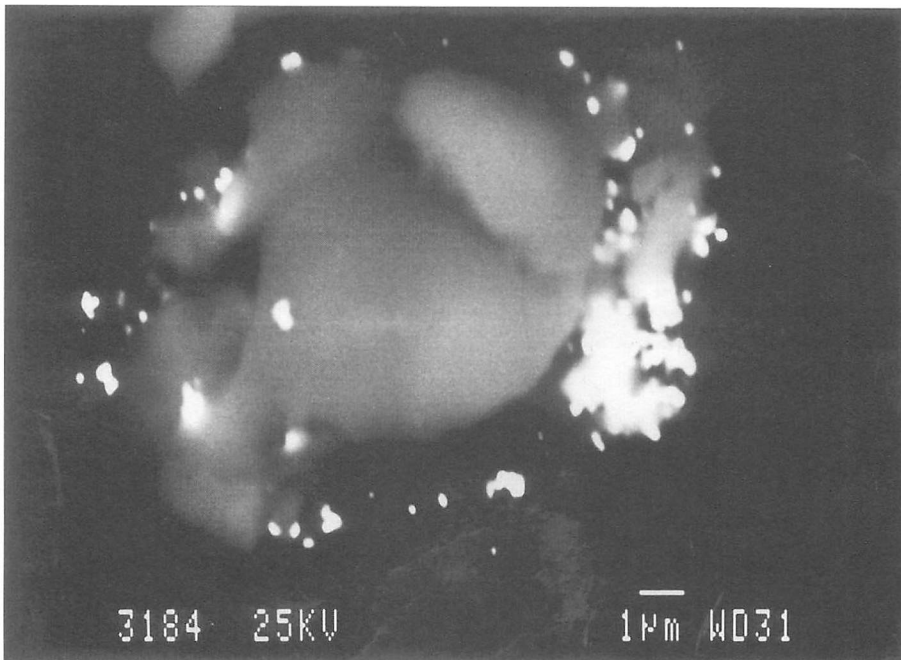
אבנר ע. 1993, באר אורה, אתר הפקת נחושת, חדשות ארכיאולוגיות צט: 104.
אבנר ע. בדפוס. עברונה, חוה חקלאית אסלאמית קדומה בערבה הדרומית, עתיקות.
פורת י. 1987. בארות מנהרה בערבה. קדמוניות 106-114:20.
רותנברג ב. 1967. צפונות נגב. רמת גן.

- Amit, R., Zilberman E., Porat N. and Enzel Y. (1999). Relief inversion in the Avrona playa as evidence of large-magnitude historical earthquakes, southern Arava Valley, Dead Sea Rift. *Quaternary Research* 52, 76-91
- Avner, U. In press 1. Additional notes on the excavation at Be'er Orah. 'Atiqot.
- Avner, U. In press 2. Ancient water management in the Southern Negev. *ARAM*
- Avner U. and J. Magness, 1998. Early Islamic Settlement in the Southern Negev. *BASOR*. 310:39-57.
- Avner, U., Gilat, A., R. Bogoch and M. Shirav, in press. Wadi Tawahin, an Early Islamic Gold Production Site Near Eilat. 'Atiqot.
- Bogoch R., M. Shirav, N. Beyth and L. Halicz 1993. Geochemistry of Ephemeral Stream Sediments in the Precambrian Mouontainuos Arid Terrain in Southern Israel. *Journal of Geochemical Exploration* 46:349-364
- Dunlop, D. M. 1957. Sources of Gold and Silver in Islam According to Al-Hamdani. *Studia Islamica* 8:29-49.

בשנת 1987 נסקר האתר מחדש על ידי ע. אבנר, ונמנו בו 16 אתרי משנה הפרושים לאורך 700 מ' במעלה הערוץ. בשנים 1988-1992 התנהל (על ידי המכון הגיאולוגי) בסביבת האתר ובערוצים נוספים, סקר גיאוכימי אשר במהלכו נתגלתה אנומליה של זהב בסחף נחלי האזור ומינרליזציה של זהב בעורקי קוורץ (4-9 ppm) ובמגע בין הדיוריט לגנייס (Bogosh et al., 1993). בעקבות גילויים אלה נערכה בשנת 1989 חפירה במבנה אחד ובמספר מתקנים, על ידי אבנר ונחליאלי מטעם רשות העתיקות, ובשיתוף אנשי המכון הגיאולוגי (Gilat et al., 1993; Avner & Magness, 1998; Avner et al., in press).

השרידים המוכרים כיום באתר כוללים 15 מבנים בעלי חדר אחד, 23 בסיסי אהלים, מספר מתקני אבן, 32 אבני שכב של מטחנות עשויות דיוריט ועשרות סדנים ומקבות אבן מסוגים שונים. אחד מאתרי המשנה (יח' 4) שימש כבית קברות קטן, אתר אחר (יח' 16) שימש כנראה כמחצבה לסלעי הדיוריט מהם נוצרו המטחנות.

המבנה שנחפר (יח' 9) הכיל ארבע מטחנות (שתים מהן היו גליויות בטרם החפירה) ומספר סדנים ומקבות. מדרום למבנה נחפרו שלשה מתקני אבן ובהם זוגות של סדנים משני סוגים ומקבות אבן רבות. סביב המטחנות והסדנים נמצאה אבקה בהירה המכילה כ- 20 ppm זהב מיקרוסקופי. רצפתו של אחד המתקנים התגלתה מדופנת כולה באבקה זו, וכך גם תחתיתו של בור דמוי פעמון שנחפר בטרסת הסחף מול המבנה. הממצאים שנאספו בסקר ובחפירה מתארכים את האתר למאות ז'-י' לספירה, וזמנם של שני תאריכי "C ראשית המאה ה'".



איור 4: תצלום מיקרוסקופ אלקטרוני של גרגר קוורץ וזהב מיקרוני, מתוך האבקה הסחונה באתר ואדי טוואחין.

האתר נמצא מצפון-מזרח למחנה באר אורה (נ"צ 14819031) לרגלי האתר הקודם. הוא נסקר לראשונה ע"י ב. רותנברג, שערך בו גם חפירות (Rothenberg 1972). הוא תיארך אותו לתקופה

הרומית, אך כיום ידוע כי עיקר פעילותו היתה בתקופה האיסלאמית הקדומה, ואף אחריה, במאות ז'-י"ג לספירה (Sharon, Avner and Nahlieli 1996; Avner & Magness 1998). משקלן של ערימות הסיגים באתר מוערך בכ- 5000 טון, המעידים כנראה על הפקה בסדר גודל של כ- 300-500 טון נחושת. מקור העפרות בעיקר במכרות נחל עמרם, שאורך המחילות הכולל בהם מגיע למספר קילומטרים (Willis 1990).

בחפירתו של רותנברג נחשפו שרידיהם של שני תנורי התכה, ותנור המסה אחד. קוטרם של תנורי ההתכה 55 ס"מ, ולרגליהם נמצאו שרידים של גומות מעוללות אליהן הוזרמו הסיגים בתום פעולת ההתכה. לסיגים צורת "עוגות" שקטרן כ 60 ס"מ ומשקלן כ 35 ק"ג.

באנליזות של דגימות סיגים (Segal, in Avner, in press) נמצא כי הם מכילים כ 3% CuO, כלומר שרמת ההפרדה של הנחושת בתהליך ההתכה היתה גבוהה. הם מכילים גם עד 37.4% CaO תופעה שאינה מוכרת לפי שעה מאתרים אחרים באזור אילת. בבדיקת מקורם של פחמים מן האתר התברר כי 60% מהם הוכנו מעצי שיטה, ו 40% הוכנו מעצי אשל ומשיחי אוכם חד ביתי. לאחרונים ערך אנרגטי נמוך יחסית והם אינם מתאימים לתעשיית פחמים. השימוש בהם מעיד על ניצול יתר של עצי השיטה, ומכאן גם על קנה המידה הגדול של הפקת הנחושת בתקופה האיסלאמית הקדומה, זאת בנוסף לעדויות מן המכרות הגדולים בנחל עמרם. באתר נחפרו גם שני מבנים פולחניים פתוחים, עשויים מ"עוגות" סיגים, אחד מהם שימש כבית תפילה פתוח, מוסלמי ונוצרי כאחד (Sharon, Avner and Nahlieli 1996; Avner, in press).

4

ואדי טוואחין

ואדי טוואחין הינו סעיף של נחל רודד, כ 4 ק"מ צפונית מערבית לאילת (נצ"מ 14228897), באזור בו נחשף דיוריס פרה-קמברי. הוא תואר לראשונה ע"י פ. פרנק

שביקר בו בשנת 1933, ומצא שרידים דלים של מספר מבנים, 12 מטחנות אבן, סדנים, וכן קברים אחדים (Frank 1934). פרנק פרש אותו כאתר תעשייתי איסלאמי להפקת בריט (BaSO4). בשנת 1965 נסקר שוב האתר ע"י נ. גליק, שחזר על תיאורו של פרנק וגם קיבל את פרושו. גליק הוסיף כי הבריט שימש בעבר בהכנת צבעים. ב. רותנברג (1967) חזר גם הוא על תיאורו של פרנק, הוסיף כי השרידים פזורים לאורך 120 מ' במעלה הערוץ, וכי החרסים שאסף שייכים לתקופה הביזנטית לכל המוקדם. רותנברג דחה את דעתו של פרנק, כיוון שלא מצא בריט באתר, אך לא הציע הסבר חליפי.

כח אדם לשאיבה. בעת החפירה הארכיאולוגית התגלו בבריכה אלפי קונכיות של שחריר הנחלים ומגדלון, קונכיות החיות במים מתוקים.

השטח המעובד סוקל ויושר היטב, עם שיפוע מתון מצפון מערב לדרום מזרח, כשברכת האגירה נקבעה בנקודה הגבוהה ביותר. מי ההשקיה הזורמו ממנה בתעלות מקבילות וצולבות, שסימנים מהן נראים בצילום מן האויר. בצידו המערבי של השטח הוקמה סוללה של אבנים ועפר, שמטרתה להגן על האדמות מהשטפונות של נחל עמרם ושל ערוצים נוספים. לאחר שמנחה החווה חתרו השטפונות בסוללה והשטח המעובד נשטף בהדרגה ברובו. גודל השטח שהשתמר כ 20 ד', אולם קטעים נוספים מן הסוללה השתמרו במרחק 1.5 ק"מ דרומה מהבריכה. על פי נתונים אלו, גדלו המקורי של השטח המעובד היה לפחות 3000 ד'.

בחפירת הבנינים התגלו כלי חרס ואבן אופייניים לתקופה האיסלאמית הקדומה, מספר מטבעות מתקופת בית אומייה וכמה אוסטרקונים, ביניהם רשימת משכורות. כמו כן התגלו גלענים של תמרים, שקדים, אפרסקים, זיתים, חרובים, וחיטה ושעורה.

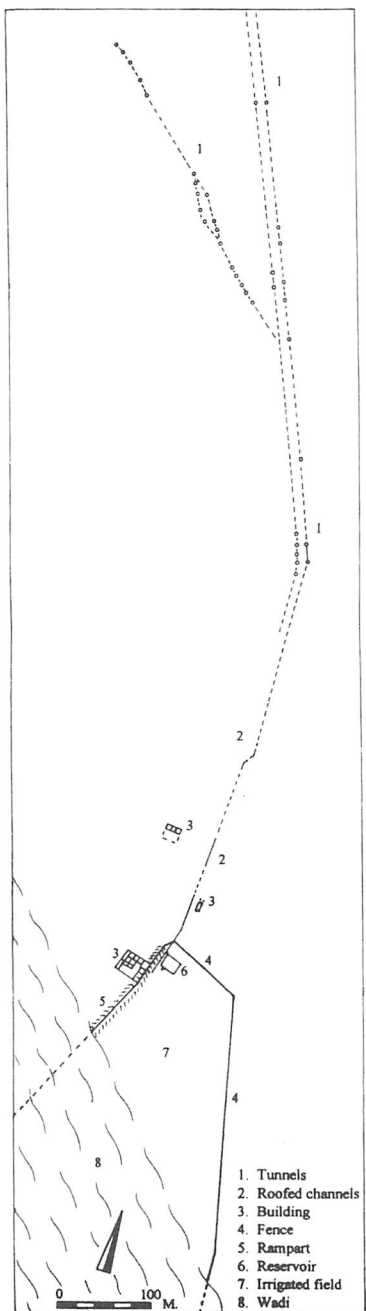
החווה הוקמה במאה הז' לספירה על קרקע בתולה, והקמתה התאפשרה בעקבות הפצת טכניקת בניית הפוגארות, שמקורן באירן, ברחבי האימפריה האיסלאמית. החווה, יחד עם שטחי החקלאות ביטבתה, בבקעת עובדה ובואדי יתם, סיפקה מזון לתושבי העיר אילה (עקבה כיום), לתושביהם של מספר כפרים בערבה הדרומית, לכורי הנחושת, לשיירות המסחר ועולי הרגל המוסלמיים בדרכם למכה.



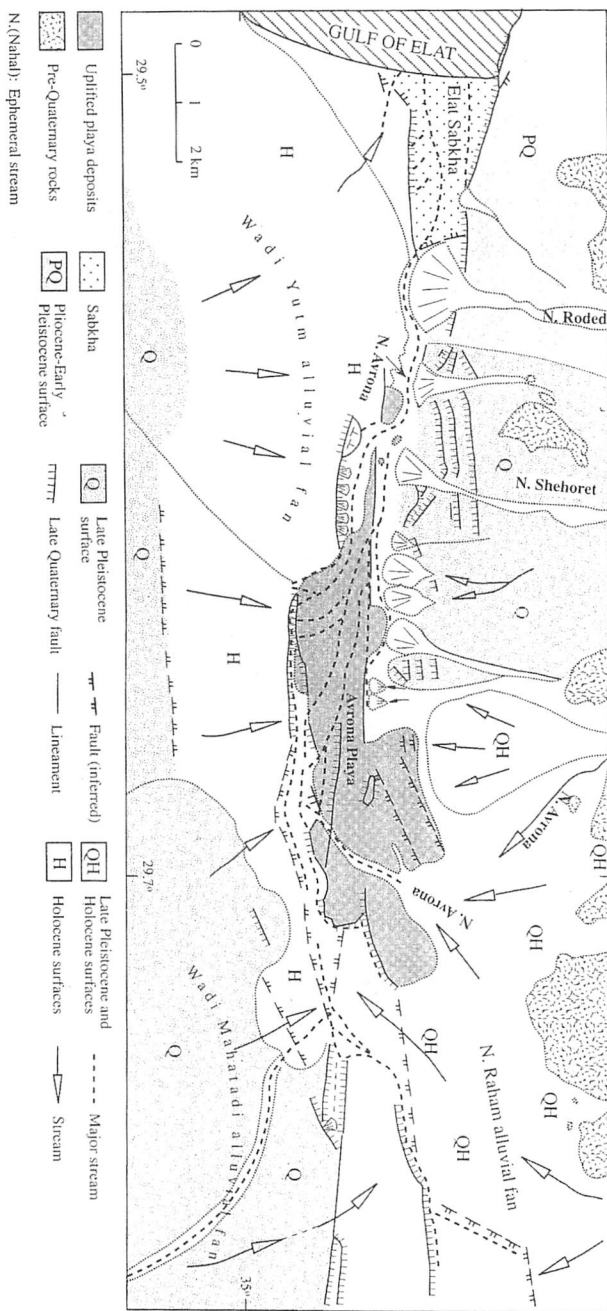
גבעת באר אורה

האתר נמצא מצפון-מזרח למחנה באר אורה (נ"צ 14839033), על גבעה גירנית מתצורת גרופית, והוא נסקר בשנת 1992 (אבנר 1993). בראש הגבעה ומורדותיה,

בשטח של כ 300 × 150 מ' מצויות מחפורות קטנות בקוטר עד 2 מ', ובמרכזה כתם של אפר, פחמים וסיגי נחושת. אבני הגיר שהוצאו מן המחפורות נופצו ברובן לגודל אגרוף. על מרבית פני השטח היו פזורים ממצאים שונים: סדני אבן (מסלעים מגמתיים וגיר), עשרות מקבות אבן, אבנים מצופות בסיגים שמקורן בדיפון תנורי התכה, חרסים וכלי צור מן האלף הה' ב' לפנה"ס, ושברים של מוטות חרס מוכתמים בסיגים. ארבעה תאריכים רדיומטרים מפחמים הראו כולם גיל סביב 1800 לפנה"ס, תקופת הברונזה התיכונה ב', ששרידים ממנה כמעט ואינם ידועים דרומה לבקעת באר שבע. כיון שבתוך כמה מאבני הגיר המקומי נמצאו תרכיזי נחושת, יתכן והאתר שימש כמכרה נחושת וכאתר התכה. אמנם ידוע על מינרליזציה של נחושת בסלעים גירניים (llani 1987), אך אם שימש האתר אמנם כמכרה, אזי הוא היחיד מסוגו המוכר בארץ.



איור 2: חוות עברונה, תכנית האתר (Aver, in press 2)



איור 3: מפה מורפולוגית של הפלייה של עברונה וציון האלמנטים המורפולוגיים והמורפוסטוניים העיקריים (Amit et al., 1999)

החוזה נמצאת בערבה הדרומית, כ 12 ק"מ צפונה לאילת (בצ"מ 14948945), אחד מארבעה אתרים בארץ בהם הוקמו מערכות חקלאיות הנשענות על פוגארות, (האחרים: פצאל, עין יהב ויטבתה). החוזה יוצאת דופן בכך שהשתמרו בה שרידים מכל מרכיבי העיקריים: מנהרות הפוגארות,

תעלות מים בנויות, בריכת אגירה, שטח מעובד ומגודר, ושלושה בנינים. האתר נסקר לראשונה על ידי אבן ארי ושותפיו בשנות החמישים ונחשב אז כשייך לתקופה הפרסית (Even Ari et al., 1982). בשנות השישים הוא נסקר שוב על ידי רותנברג (1967), שתיארך אותו לתקופה הביזנטית. החל משנת 1973 התקיימו באתר מספר עונות חפירה ע"י י. פורת וע. אבנר, בהן נקבע בביטחון כי החוזה הוקמה בתקופה האיסלאמית הקדומה, ושמשה מהמאה הז' לספירה ועד המאה הי"א לספירה (Avner, in press; Avner & Magness, 1998; פורת 1987).

מערכת הפוגארות כוללת שתי מנהרות מקבילות, כ 10 מ' אחת מהשניה, ומנהרה נוספת מתחברת ממערב. תלוליות עפר אופייניות מעטות שהשתמרו משתי המנהרות הראשיות נמצאות במרחק מירבי של 850 מ' צפונה לבריכה (איור 2). בעזרת דאר קרקע אותרו 500 מ' נוספים משתי המנהרות, אך ברור שאין זה ארכן הסופי. המנהרה הצדדית מסומנת על פני השטח לכל ארכה ע"י תלוליות עפר וארכה הוא 400 מ'. בשנת 1978 נערכה חפירה בשני פירים ובקטע המנהרה שביניהם, וכיום ניתן לבקר בו. בקטע זה עומק המנהרה כ 5 מ' מפני השטח והיא נחפרה בשכבת קרקע אבנית קשה ויציבה. מספר רעידות אדמה שהתרחשו מאז 1978 לא גרמו להתמוטטות כלשהי.

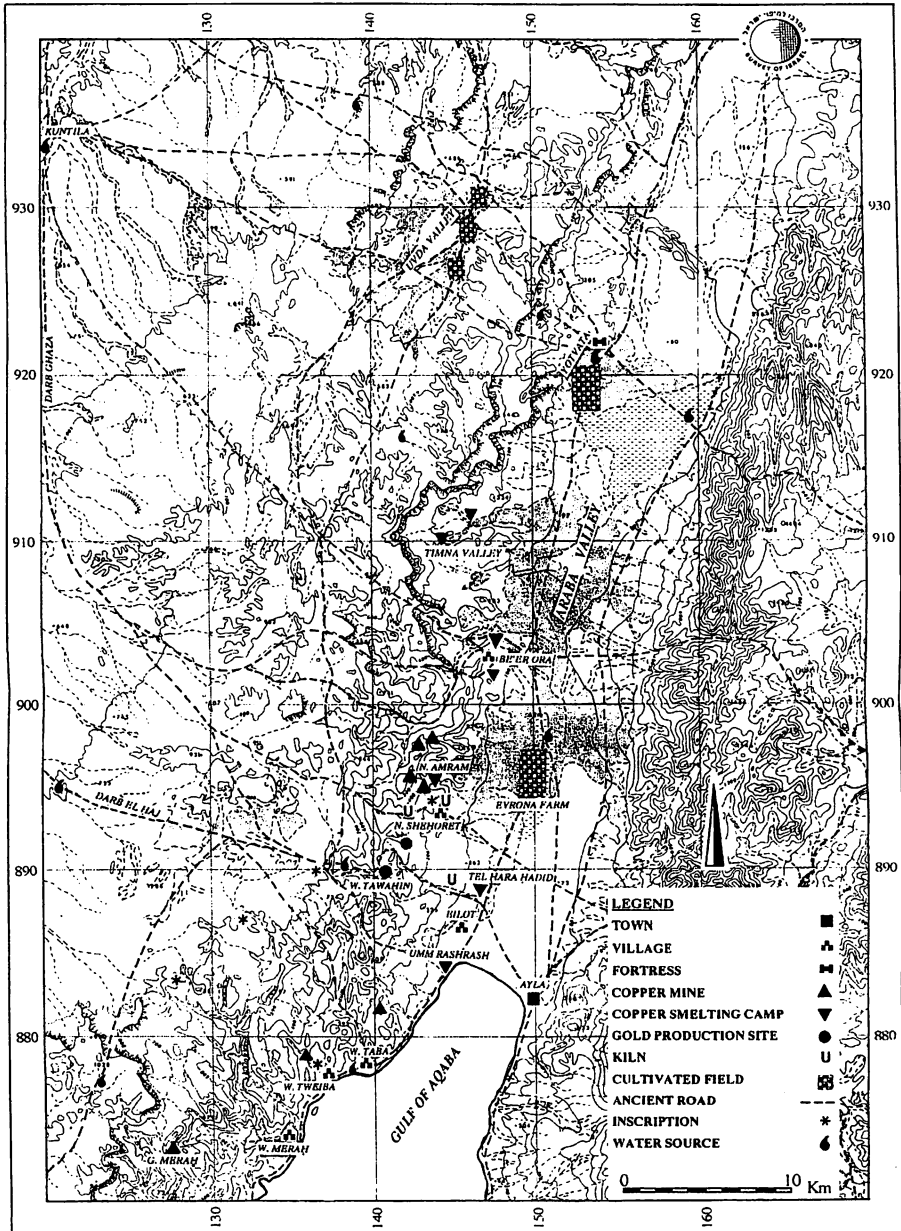
בהמשכן של המנהרות דרומה הן מתקרבות לפני השטח, והחל מעומק 3 מ' בקירוב הן מוחלפות במעין "צינור" בנוי אבן בעל חתך מלבני (כ 1.0 x 0.45 מ'). ה"צינור" נבנה תחילה בתוך תעלה פתוחה, שכוסתה לאחר מכן בעפר. בחלקו התחתון של ה"צינור" הוא טווח בטיח הידראולי, עליו השתמר משקע טרוורטין שמסמן את גובה הזרימה של המים, כ- 40 ס"מ. במרחק כ 200 מ' צפונה לבריכת האגירה התגלתה שבירה במהלכו של הצינור המזרחי, שהוסט וחובר לתואי המערבי. שינוי זה נעשה תוך כדי הקמת המערכת, במאה הז' לספירה, והוא מתקשר לתצפיות נוספות: כיום קרקעית הצינור בקטע זה נמוכה ב כ 60 ס"מ מקרקעיתה של בריכת האגירה, כתוצאה מתנועה טקטונית. יתכן שחלק מתנועה זו התרחש בעת הקמת המערכת, וחייב את תיקון תואי הצינור כך שלא יהיה נמוך מן הבריכה. מחקר סיימי שנערך בשנים האחרונות ע"י אמית, זילברמן, פורת ואמל (1999) תומך באפשרות זו.

בריכת האגירה בנויה בפינה הצפון מערבית של השטח המעובד. מידותיה כ 14.5 x 17.5 מ', עומקה 0.8 מ' בלבד, ובצידה הדרומי הותקנה מגופה לוויסות המים להשקיה. הבריכה, ולמעשה מערכת המים כולה, הופעלה בגרביטציה בלבד תוך סגירה ופתיחה של מגופות, ללא הקצאת



- עוזי אבנר¹ משה שירב²
 1. מכון הערבה ללימודי סביבה
 2. המכון הגיאולוגי, ירושלים

הסיוור מתמקד בארבעה אתרים ארכיאולוגיים באזור אילת, בעלי ענין גיאולוגי: 1. חוות עברונה, חווה חקלאית מן התקופה האיסלאמית הקדומה, 2. מכרה נחושת ואתר התכת נחושת מן האלף הדי-ב' לפנה"ס ליד באר אורה, 3. אתר התכת נחושת מן התקופה האיסלאמית הקדומה ליד באר אורה, 4. ואדי טוואחין, אתר הפקת זהב (ראה מפה באיור 1).



גרפונקל, צ., 1970. הטקטוניקה של השוליים המערביים של הערבה הדרומית. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית ירושלים, 204 ע'.

דרוקמן, י., ויסבורד, ט. וגרפונקל, צ., 1993. מפה גיאולוגית של ישראל, גליונות יטבתה ואילת, קנה מידה 1:100,000. הוצאת המכון הגיאולוגי.

שגב, ע. ובייט מ., 2000. מפה גיאולוגית של ישראל, גליון הר שגוב, קנה מידה 1:150,000. הוצאת המכון הגיאולוגי.

- Agron, N. and Bentor, Y.K., 1981. The volcanic massif of Biq'at Hayareah (Sinai-Negev), a case of potassium metasomatism. *J. Geol.* 89, 479-496.
- Bartov, Y. and Steinitz, G., 1982. Excursion to Thamad. *Isr. Geol. Soc. Ann. Meet.* 1982, Elat and Eastern Sinai, pp. 68-85.
- Baer, G. and Segev, A., 1996. The state of paleostress along the Milhan fault, southern Israel, with implications on the sense of fault displacement. *Geol. Surv. Isr. Current Res.* 10, 67-73.
- Beyth, M., Segev, A. and Bartov, Y., 1993. Selected stratigraphic and structural features in the Beer Ora sheet. *Geol. Surv. Isr. Current Res.* 8, 51-53.
- Beyth, M., Henkel, J. and Greeken, R., 1993. Applying image processing techniques and reflectance measurements combined with detailed field work for analyzing TM data of an arid area, southern Israel and south west Jordan. *Geol. Surv. Isr. Rep. GSI/25/93*, 29 p.
- Beyth, M., Stern, J.R., Altherr, R. and Kroner, A., 1994. The Late Precambrian Timna igneous complex, southern Israel: Evidence for comagmatic-type sanukitoid monzodiorite and alkali granite magma. *Lithos* 31, 103-124.
- Ginat, H., Zilberman, E. and Rosenfeld, A., 1996. New finding of Early Pleistocene lake deposits in Nahal Zihor, southern Negev. *Geol. Surv. Isr. Current Res.* 10, 55-61.
- Sneh, A., Bartov, Y., Weissbrod, T. and Rosensaft, M., 1998. Geological map of Israel, 1:200,000 (Sheet 4). *Geol. Surv. Isr.*, Jerusalem.
- Mushkin, A., Navon, O., Halicz, L., Heimann, A., Woerner, G. and Stein, M., 1999. Geology and geochronology of the Amram Massif, southern Negev Desert, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 48, 179-193.
- Segev, A., 1987. The age of the latest Precambrian volcanism in southern Israel, northeastern Sinai and southwestern Jordan - a reevaluation. *Precamb. Res.* 36: 277-285.

לתהליכי מודיפיקציה והמסה של שכבות גיר בשלב דיאגנטי מוקדם. צורת הבולבוסים ורציפותם מוכתבת על ידי העובי ומאפייני סלע הגיר המקורי וכן מידת המודיפיקציה וההמסה של הסלע. ג. "דייקים" של גיר וקירטון חוארי בעובי מקסימלי של מטר וחצי, בתנוחה אנכית ובאורך של עד עשרות מטרים. גופי סלע אלה נחשפים לרוב בתצורת מנוחה בשכבות העשירות בבולבוסים (ציור 7). לפחות שניים מהם גובהם כ- 5 מטר והם מצויים בין שתי שכבות של בולבוסים. היווצרות ה"דייקים" קשורה כנראה להיווצרות סדק ראשוני, בשלב דיאגנטי מוקדם, שלאורכו נעו תמיסות עשירות בקרבונט אשר גרמו להצטברות גיר קשה בשולי הסדקים. כנראה שקיים קשר בין תהליכי היווצרות הבולבוסים לבין תהליכי היווצרות "הדייקים", המצויים באותן השכבות.

מקורות לדברי ההסבר, חיבורים ומפות לעיון נוסף

אבני, י., 1998. ההתפתחות הגיאולוגית של הנגב המרכזי והדרומי כעדות להתפתחות שולי טרנספורם ים המלח בסוף הניאוגן וברביעון. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית ירושלים.

בייט, מ., שגב, ע. וברטוב, י., 1999. מפה גיאולוגית של ישראל, גליון באר אורה, קנה מידה 1:50,000. הוצאת המכון הגיאולוגי.

בילסקי, מ., 1982. שלבים בהתפתחות המסיב הערבו-נובי בדרום סיני. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים, ע' 155.

ברטוב, י., 1967. הגיאולוגיה של אזור באר אורה. עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

ברטוב, י., 1974. השברים ומבני הכיפות של מרכז סיני. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים, ע' 143.

גינת, ח., 1991. הגיאולוגיה והגיאומורפולוגיה של אזור יטבתה. דו"ח המכון הגיאולוגי מס' GSI/8/91.

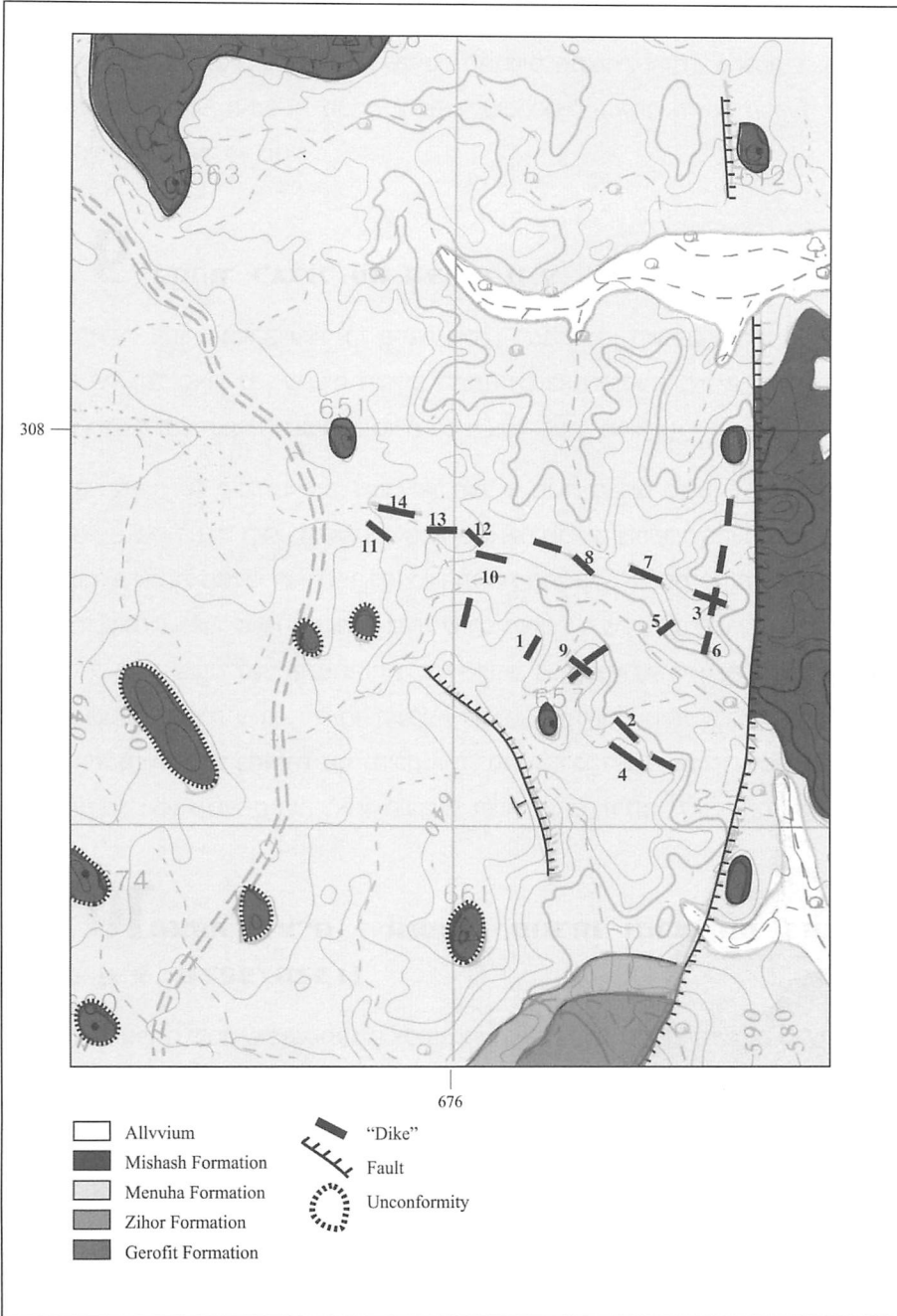
גינת, ח., 1995. מפה גיאולוגית, גליון יטבתה, קנה מידה 1:50,000. הוצאת המכון גיאולוגי.

גינת, ח., (בהליכי הוצאה לאור). מפה גיאולוגית של ישראל, גליון יהל, קנה מידה 1:50,000. הוצאת המכון גיאולוגי.

גינת, ח., (בהליכי הוצאה לאור). מפה גיאולוגית של ישראל, גליון מצפה סיירים, קנה מידה 1:50,000. הוצאת המכון גיאולוגי.

גינת, ח., 1997. הפליאוגיאוגרפיה ושלבי התפתחות הנוף באגני הנחלים חיון וצחור. דו"ח המכון הגיאולוגי מס' GSI/19/97.

ב. "שדות בולבוסים" בהופעה מרשימה במיוחד. הבולבוסים גירניים ומצויים בארבע שכבות סלעי גיר שונות, בתצורת מנוחה, כאשר הופעתם בכל אחת מהשכבות שונה. בחלק מהשכבות מופיעים הבולבוסים בצפיפות גבוהה ולעיתים אף כחלק משכבה גלית ורציפה. בשכבות אחרות ישנם בולבוסים המנותקים ומרוחקים האחד מהשני. היווצרות הבולבוסים קשורה כנראה



איור 7: מפת מחשופי הדייקים בתצורת מנוחה

תחנה 8 תצפית על בקעת סיירים (נ.צ. 1374/9203)

בקעת סיירים הינה בקעה טקטונית התחומה משני צדדיה על ידי שברים שכיוונם הכללי צפון-דרום (איור 6). אל הבקעה מתנקזים מים ממורדות הר שגוב והר בשמת בדרום, הר ברך ממזרח ומצפה סיירים ממערב. הבקעה מנוקזת כיום על ידי נחל בקעתים לכיוון צפון, אל בקעת עובדה. בצידה המזרחי חשופים בעיקר סלעים מתצורת גרופית ואילו בצידה המערבי מעט סלעים מתצורת מנוחה המכוסים בחתך עבה של קונגלומרטים מתצורת ערבה. בחלקה הצפוני של הבקעה נחשפים סלעי התצורות מנוחה ומישאש. עובי המילוי האלוביאלי של הבקעה משתנה מדרום לצפון מ-15 ועד 30 מטר.

תחנה 9 בסמוך לגבול עם מצרים (נ.צ. 1327/9170)

על גבי מדרגת הנוף הגבוהה עובר קו פרשת המים המבדיל בין היובלים העליונים, המתונים והרחבים של נחל פארן לבין ערוצים תלולים המתנקזים כיום לבקעת סיירים. במדרגת נוף זו נחשפים סלעים מגג תצורת גרופית הנטויים לכיוון צפון-מערב (איור 6).

מחשופים נוספים של קונגלומרטים, בעובי של מעל 10 מטר, מצויים בין קו פרשת המים לבין בקעת סיירים ובשולי נחל קידר. קונגלומרטים קדומים אלו מכילים בעיקר חלוקי גיר וצור מעוגלים ותת-מעוגלים שנמרו מסלעי חבורת יהודה. כיוון תנוחת החלוקים, פריסת הקונגלומרטים וסלעי המקור מהם נמרו, מעידים שהם הורבדו בנחל שזרם מאזור הר ברך. קונגלומרטים אלו הושקעו בעמק רדוד, שהיה באזור לפני התפתחות בקעת סיירים, בערוץ שזרם לכיוון צפון-מערב אל אגם כונתילה ושויכו לתצורת ערבה. לאחר השקעת שכבת הקונגלומרט היא עברה שבירה והטיה, ולפיכך היא מצויה כיום במדרגת נוף נמוכה יותר. ניתן על כן לקבוע שציקר השבירה בשוליה המערביים של בקעת סיירים היה לאחר השקעת תצורת ערבה, כלומר לאחר הפליוקן.

תחנה 10 מצפה סיירים - תופעות מזרות ומרשימות בתצורת מנוחה (נ.צ. 1326/9276)

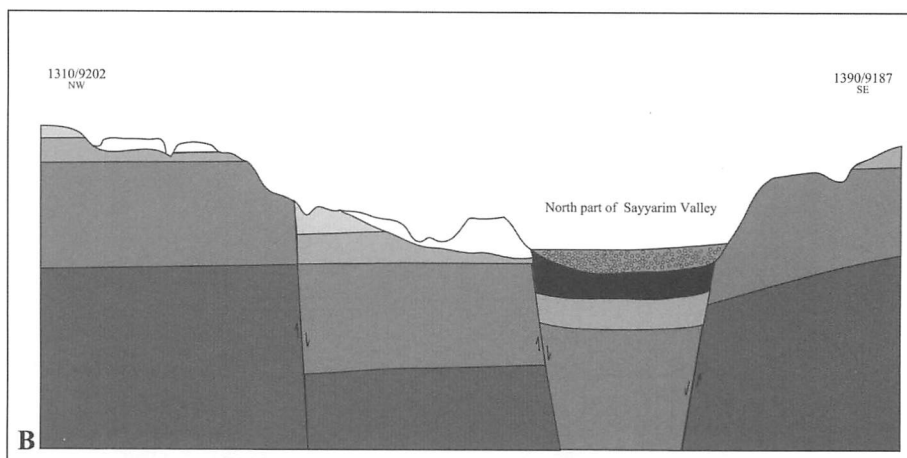
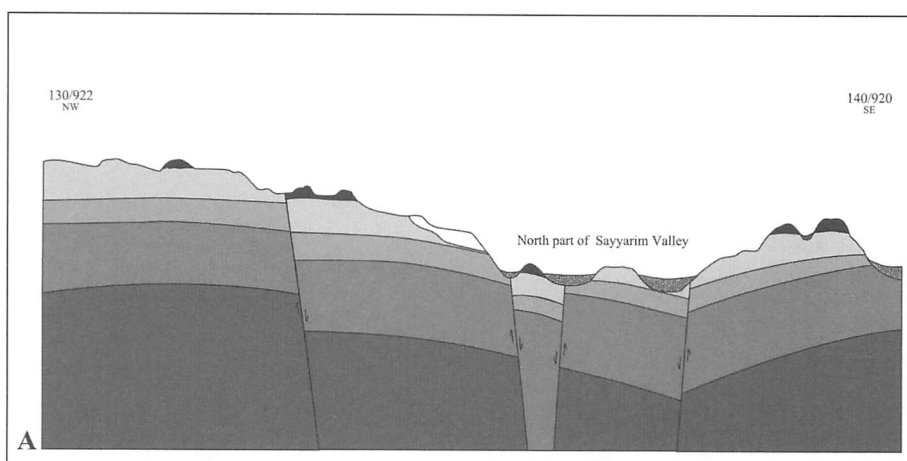
באזור מצפה סיירים, כחמישה קילומטרים צפונית מערבית לבקעת סיירים, נחשפים סלעי תצורת מנוחה על פני שטח רחב. בשטח בולטות מספר תופעות מעניינות הקשורות בסלעי התצורה:

א. שינויי פציאס, במרחקים קצרים מאוד, בחלקה העליון של תצורת מנוחה - מעבר משכבות קירטון בעובי של 20 מטר לשכבות גיר, חרסית, חואר וצור בעובי של 10-5 מטרים. הסיבה לשינויי הפציאס קשורה אולי למבנים סנוניים בקרקעית הים, להמסה דיאגנטית של חלק מהסלעים בחתך או לגלישות.

תחנה 7 העתק מלחן בגליון באר אורה (נ.צ. 1410/9170).

העתק מלחן אשר כיוונו צפ'–צפ'–מז' חוצה את גליון באר אורה בפינה הצפונית מערבית שלו. אופי ההעתק משתנה לאורך הסטריק שלו כאשר בעיקרו הוא שבר סיניסטרולי צעיר אשר בפעילותו השפיע על עיצוב הנוף. הצד המזרחי של ההעתק עלוי ומורכב, במקומות, מגושים של תצורת גרופית ואילו הצד המערבי ירוד ומורכב מגושים שבנויים מסלעי התצורות מנוחה, מישאש, ע'רב וטקיה.

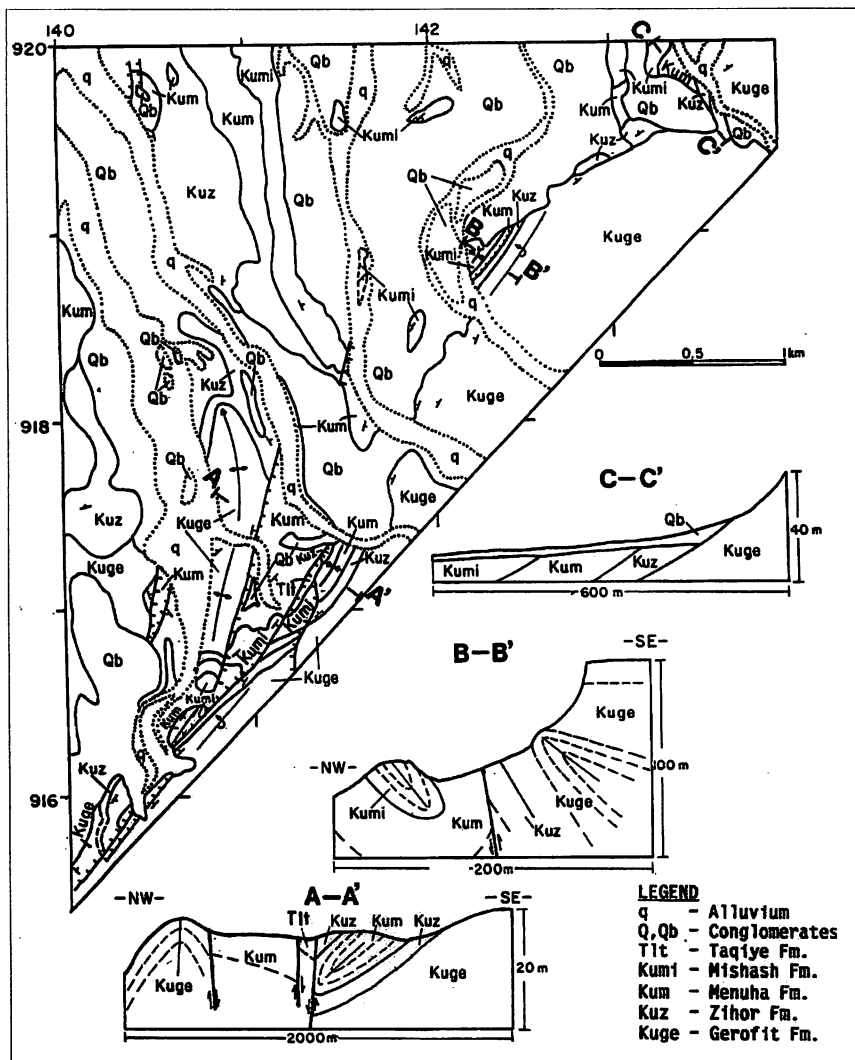
באיור 5 בחתך הדרומי (A-A'), הזריקה האנכית היא מקסימאלית, בחתך המרכזי (B-B') השכוב הפוך ואילו בחתך הצפוני (C-C') הנטיית חדות, עובי החתך מצומצם וקיים ייצוג לכל התצורות שהוזכרו.



איור 6: חתכי רוחב בבקעת סירים

בקעת תמנע נוצרה יחד עם בקע ים המלח ועל כן גיל המצוק ומערכות הניקוז המזרחיות צעיר מ- 19 מ.ש. על גבי המצוק מצוי כיום קו פרתת המים המפריד בין אגן הניקוז של בקעת תמנע, הזורם למלחת יטבתה, לבין אגן הניקוז של נחל בוטם הזורם לבקעת עובדה. תהליכי בליה וסידוק לאורך המצוק גורמים לנסיגה הדרגתית של המצוק לכיוון מערב. החתך של תצורת צחיחה, שהושקע ביובלים העליונים של נחל בוטם, נסחף היום על ידי ערוצים צרים ותלולים המתנקזים מזרחה.

בחלקו התחתון של המצוק, בסמוך למגע בין התצורות החוליות: אמיר ועברונה, מגיל קרטיקון תחתון, מבחינים בעיגולים צפופים של סחף בהיר המציינים את מקומן של חפירות לחיפוש והפקת נחושת מלפני כ- 6000-3200 שנים (ידועים בכינויים: "הצלחות").



איור 5: מפה גיאולוגית וחתכים של העתק מלחן

4 תחנה תצפית מזרח לנחל בטמים (נ.צ. 1368/9082)

ממערב נראה הרכס של הר שגוב בנוי בחלקו התחתון מסלעי תצורת אורה ובחלקו העליון מסלעי תצורת גרופית. הרכס תחום ממזרח ע"י הסעיף המערבי של קו המילחן המלווה בגלישות של תצורת גרופית. מצפון-מזרח נראה הרכס של הר בשמת הבנוי גם הוא מסלעי תצורת גרופית. בין שני רכסים אלה מצוי שקע שנוצר ע"י העתקי קו המילחן ובו חתור הערוץ הנוכחי של נחל בטמים. נוכחותם של מחשופי תצורת ערבה סמוך ולאורך הכביש לבקעת עובדה מסמנים את מקומו של הנחל בתקופת הפליוקן, בה הוא זרם לצפון-מערב. כיום הנחל זורם לכיוון דומה, אך הוא מתנקז לגרנן של בקעת סיירים אשר נוצר מאוחר לתצורת ערבה. בבקעה הסמוכה, מצפון לתחנה, הורבדו סלעי תצורת צחיחה לאחר חסימת הערוץ הפליוקני של נחל בטמים ע"י העתקי המילחן.

5 תחנה העתק מלחן סמוך להסתעפות הדרך להר ברך (נ.צ. 1369/9101)

תחנה זו מצויה באזור הפיצול של מערכת העתקי קו המילחן. הסעיף העיקרי בחלק הדרומי של מערכת זו, לאורכו נסענו עד כה, כיוונו צפון-דרום והוא יוצר מערכת מדורגת של גרביים. הסעיף המשני כיוונו צפ' מז' - דר' מע', שהוא הכיוון הראשי של קו המילחן, חוצה את רכס הר שגוב ועובר לשטח מצרים מזרח לנ'בל א-צפרא. בהמשכם לצפון-מזרח עוברים העתקי המילחן כ- 3 ק"מ ממזרח לבקעת סיירים ובשוליים המזרחיים של בקעת עובדה.

תחנה זו סמוכה למקום בו חוצים העתקי המילחן את נחל בטמים וקרוב לקצה הצפון מזרחי של הסגמנט השני (מזרח) של מערכת שבירה זו. בדומה לחלקים רבים של ההעתק מופיעים כאן גושים מסלעי תצורות מנוחה ומישאש, באורך של עשרות ומאות מטרים, נטויים בשיפוע חזק, שבורים האחד ביחס לשני וביחס לגושי סלע והשוליים הבנויים מתצורת גרופית. בהכללה ניתן לראות מבנים אלה כמילוי של גרביים אשר נוצרו לאורך העתק תזזה אופקית שמאלית. בהמשך הסיור נסע לאורך ההעתק ונראה את גושי הצור הכהים המסמנים את מיקומם של הגרביים הללו.

6 תחנה נחל בטם מזרח להר ברך - תצפית על בקעת תמנע והערבה (נ.צ. 1410/9108)

התצפית ממוקמת סמוך לקו פרשת המים, על משטח המכוסה ע"י תצורת צחיחה שהורבדה על סלעי תצורת אורה. במבט למזרח ניתן לראות את מלוא החתך הסטרטיגרפי החשוף בבקעת תמנע ושוליה. החל מהסלעים הפלוטוניים הניאופרוטרוזואיים, הבונים את הר תמנע, דרך תצורות תמנע ושחרות מגיל קמבריום, ועד לתצורת גרופית מגיל טורון. מרכז הבקעה בנוי מגוש טקסוני שהתרומם על גבי העתקים הפוכים (בכיוון מז' צפ' מז' - מע' דר' מע') והוא תחום מכל צדדיו ע"י חמישה העתקים.

תחנה 2 הישר סעיפים (נ.צ. 1368/9008)

בנסיעה מתחנה 1 הכביש חוצה את העתק תמד ועולה בואדי החותר באבני החול מתצורת סמר, הנתחמות ממזרח במגע של העתק עם תצורת גרופית, וממערב (בהר שני) מכוסות ע"י תצורת חצרה. ההמשך, בדרך העוברת על סלעי תצורת גרופית, לתצפית הממוקמת מדרום למישר סעיפים.

מישר סעיפים הוא בקעה שטוחה שצורתה ככף יד בעלת שש אצבעות, גובה התבליט כ- 50 מ' והניקוז כיום בערוץ צר הזורם לדרום, לעבר נחל שני. בקעה זו היא שריד של נחל רחב ושטוח אשר נחסם ממערב ע"י פעילות טקטונית ונישבה מדרום כתוצאה משינוי בבסיס הניקוז. עדות בולטת לשבייה היא רוחבו של העמק (כ- 800 מ') אשר איננו עומד ביחס סביר לשטח אגן הניקוז שלו. ממערב לגבול הבין-לאומי עם מצרים, ומעבר למערכת השבירה של המלחן, נראה ההמשך של נחל רחב זה זורם לצפון-מערב. חתך גיאולוגי של הבקעה (ציור 4) מדגיש את גדוע הבקעה מאגן הניקוז שממזרח לה ואת מערכת ההעתקים של קו המלחן ממערב. המצאות מחשוף של תצורת ערבה במרכז הגרן המובנה ע"י העתקי קו המלחן, החוסם את הזרימה מערבה ממישר סעיפים, מצביע על פעילות העתקה פלייסטוקנית אשר שינתה את מערכת הניקוז. פעילות זו יצרה אגנים מקומיים בהם שקעו הסדימנטים האדומים של תצורת צחיחה.

תחנה 3 תצורת צחיחה בנחל עתק (נ.צ. 1362/9044)

בעמק בו מצויים היובלים העליונים של נחל עתק דרומי מצוי חתך אלוביאלי בעובי מקסימלי של עשרה מטר. בחלקו התחתון והעליון של החתך חלוקים שכיוון תנוחתם מעיד על השקעתם בנחל שזרם בכיוון הערוץ הפעיל כיום.

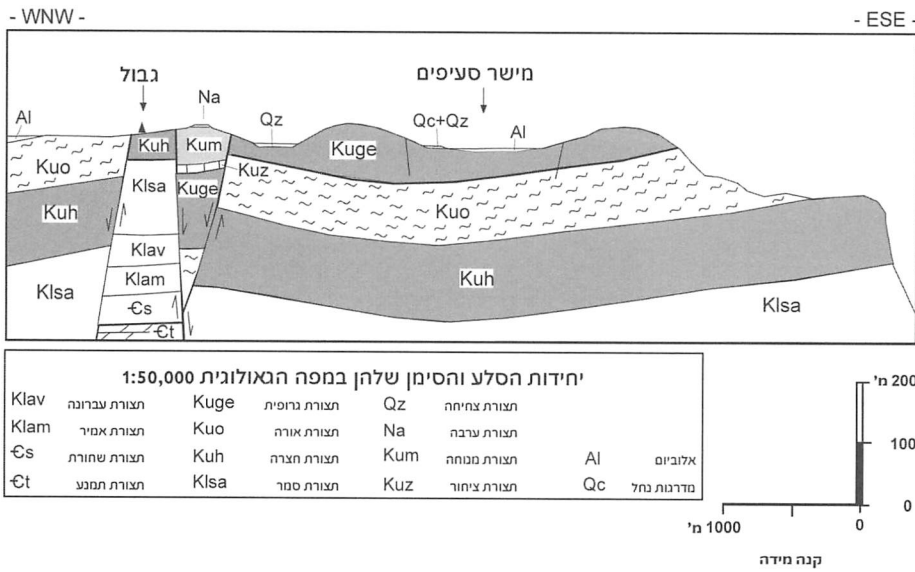
בין שכבות החלוקים שכבה אדומה ובמקומות אפורה ללא חלוקים. בתוך שכבה זו תצבירי קרבונט שקוטרם והעליון ס"מ. החלק האפור מזכיר בהופעתו כבול.

הקונגלומרטים הושקעו בערוץ של נחל שזרם כנראה בתוואי דומה לערוץ הפעיל כיום. לעומת זאת השכבה ובה החומר דק הגרר הושקעה בתקופה בה הייתה כמות רבה של חומר דק זמין במדרונות אגן הניקוז וכן שיפוע האפיק היה כנראה קטן יותר. בהתאם לכך אנרגיות הזרימה היו נמוכות ובעמק הצטבר בעיקר חומר דק גרר. יתכן שבתקופה מסוימת מרבית הזרימות הסתיימו בנקודה זו בעמק ובמים עומדים ובתנאים מחזרים התפתח החתך האפור. בתקופות של אתנחתא בזרימה החלה להתפתח קרקע ובה תצבירי קרבונט. אופי הקרקע מעיד על כך שבתקופה זו האקלים היה צחיח למחצה (ולא צחיח קיצוני, כפי שהוא היום). קרקעות קלציות אדומות מוכרות מאתרים נוספים בנגב הדרומי והן הוגדרו כתצורת צחיחה שגילה מוערך כפליסטוקן תחתון (איור 2).

תחנה 1 הכביש לבקעת עובזה - הרי נשף והעתק תמד (נ.צ. 8981/1370)

התחנה ממוקמת על חלקם המזרחי של הרי נשף, הבנויים מסלעים וולקניים אלקליניים, כמו ריוליט, טוף ואיגימברית וכן סלעים פלוטונים דודים בהרכב דומה. סלעי הרי נשף וההמשך המזרחי שלהם בהר עמרם שייכו לפאזה הוולקנית האחרונה של האורוגן הפן-אפריקני ותוארכו ל- 529 ± 12 מליון שנים (מ.ש.).

מבט מדרום לצפון לעבר העתק תמד ולכיוון הרכס של הר שני. העתק תמד הוא הדרומי ברצועת ההעתקים החוצה את סיני והנגב ממערב למזרח. ההעתק מגיע לאזור הרי אילת, עובר כפיפה לצפון ליד באר אורה וממשיך מזרחה לבקע ים המלח והערבה. המשכו בצד הירדני בהעתק ואדי דנה. העתק תמד הוגדר כדקסטרולי בעל זריקה אופקית של כ- 0.5 ק"מ וזריקה אנכית מקסימלית של 1000 מ'. גיל ההעתק נמצא צעיר מכ - 20 מ.ש.



איור 4: חתך רחב באזור מישר סעיפים.

באזור הסיוור עובר השבר בואדי שני ומעמיד מדרום את הסלעים הוולקניים הניאופרוטוזואים/קמבריים של הרי נשף אל מול חולות תצורת סמר, מגיל קרטיקון תחתון, בבסיס הר שני ותצורות אורה וגרופית מזרחה להר שני.

פעילות טקטונית אינטנסיבית, כנראה לקראת סוף תקופת המיוקן, הביאה לחשיפת סלעי התשתית הפרהקמברית ואבני החול באזור הרי אילת ובקעת תמנע. בתקופה זו אף נוצרו קווי פרשות המים העיקריים שהבדילו בין מערכות הניקוז המפותחות לכיוון הערבה ומפרץ אילת לבין מערכת הניקוז שהתפתחה בהתאם לשיפוע הרגיונלי של הנגב הדרומי, לכיוון צפון מערב. במהלך הפליוקן הושקעו בנגב הדרומי, במורד מערכות הניקוז, קונגלומרטים של תצורת ערבה המכילים בעיקר מאסף חלוקים מסלעי חבורת יהודה. נחלים זרמו בתעלות רחבות ורדודות בעיקר אל אגם כונתילה.

הטיה טקטונית דרגתית מזרחה של הנגב הדרומי, בשיעור של מעלה אחת, הביאה לשינויים במערכות הניקוז. בחלק מהעמקים התפתחו מערכות ניקוז מקומיות בהן הושקעו חלוקים שנמרו מסלעי המשקע הימיים הסמוכים ועמם כמות רבה של חומר דק אשר נסחף מהמדרונות. הזרימה בחלק מהעמקים לא הייתה רציפה ולכן בסדימנטים האלוביאליים, בתקופות בהן לא הייתה זרימה, החלו להתפתח פליאוסולים אדומים המכילים תצבירי קרבונט. סדימנטים אלו הוגדרו בנגב הדרומי כתצורת צחיחה, שגילה נקבע כפלייסטוקן תחתון, כאשר עיקר הפדוגמה התרחשה כנראה באקלים צחיח למחצה.

תהליכי שבירה לאורך העתק מלחן ומערבה יותר הביאו להיווצרות הדרגתית של הבקעות סיירים ועובדה. השקעים הסטרוקטורליים החדשים שנוצרו גרמו לניתוק מערכות הניקוז העתיקות. בהתאם לכך "התארגנה" מחדש מערכת הניקוז לכיוון הבקעות שמהוות עד היום בסיסי סחיפה אוטונומים למחצה ובהם מושקעים סדימנטים אלוביאליים. המים והסחף הדק ביותר ממשיכים בזרימתם בנחל חיון לכיוון ים המלח. בשולי הבקעות ובערוצי הנחלים המנתקזים אליהן הושקעו קונגלומרטים ובהם חלוקים שנמרו מתצורת ערבה הפליוקנית.

תהליכי סידוק ובליה לאורך מצוק ההעתקים גורמים לנסיגה הדרגתית של מצוק ההעתקים מערבה. כך גלים לאט ובהדרגה השטחים התורמים מים באגני הניקוז של המלחות עברונה ויטבתה.

(פרוט של פרסומי המקורות, מחקרים גיאולוגיים ועבודות המיפוי הגיאולוגי שנעשו באזור מופיע בסוף דפי ההסבר לסיור זה).



איור 3: תצלום לוויין מעובד של האזור.

מאז נסיגת הים בסוף תקופת האיאוקן היה אזור הנגב הדרומי חשוף לתהליכי גדוע, בליה, סחיפה והשקעה שעיצבו את תוואי הנוף כתגובה לדפורמציות הטקטוניות.

של יחידות סלע. הנחלים בשולי הערבה קצרים ותלולים וזורמים אל בסיסי הסחיפה המקומיים במלחות עברונה ויטבתה (איור 3).

העתק מלחן הוא הארוך מבין העתקי הנגב הדרומי ונמשך לאורך כ-70 ק"מ בין שברי הרוחב תמד ופארן. את ההעתק מלווה רצועת מעוות ברוחב של כמה מאות מטרים. לאורך חלקו הדרומי של ההעתק, ממזרח לבקעת סירים ובשוליים המזרחיים של בקעת עובדה, התפתחה כפיפה חריפה של סלעי חבורת יהודה. עוצמת המעוות משתנה מאוד לאורך ההעתק וכוללת קמטים, הסטות אופקיות, לרוב שמאליות והעתקות שלהן רכיב אנכי בעוצמה של כמה עשרות מטרים. עקר הפעילות הטקטונית לאורך העתק מלחן החלה כנראה במהלך המיוקן ולפיכך נשמרו במבנים לאורך ההעתק סלעים מהתצורות מנוחה, מישאש, ע'רב וטאקיה לצד סלעים מתצורת גרופית. פעילות מאוחרת יותר הביאה ליצירת בקעת עובדה ולהדגשת מדרגת הנוף שממזרח לבקעת סירים.

חברית ההעתקים הנוספים באזור הבקעות, בכיוון כללי צפון-דרום, קשורים למערכות השבירה אשר התפתחו בעיקר לאחר הפליוקן בשולי בקע ים המלח והערבה. עוצמות הזריקה האנכית לאורך שברים אלו לרוב קטנות והן שגורמות ליצירת הבקעות סירים ועובדה.

STRAIGRAPHY טרטיגרפיה

SYSTEM תקופה	SERIES / STAGE סדרה / דרגה	SYMBOL סימן	THICK. עובי מ'	LITHOLOGY מסלע	LITHOSTRATIGRAPHY ליתוסטריגרפיה			
					MAPPING UNITS יחידות מיפוי	GROUP חברה		
QUATERNARY קוורטר	PLEISTOCENE - HOLOCENE פלייסטוקן - הולוקן	Al			Alluvium אלובים	DEAD SEA ים המלח		
		Qc	0-20		Wadi terraces מדרגת נחל			
		Qz	10		Zehiha Formation תצורת צחיחה			
NEOGENE ניוגן	PLIOCENE פליוקן	Na	0-10		Arava Formation תצורת ערבה	MOUNT SCOPUS הר הצופים		
					Mishash Formation תצורת מישאש			
CRETACEOUS קרטיקון	UPPER עליון	CAMPANIAN קמפן	Kumi	40		Menuha Formation תצורת מנוחה	JUDEA יהודה	
		SANTONIAN סנטון	Kum	50		Zihor Formation תצורת ציזור		
		CONIACIAN קוניאק	Kuz	10-15		Geroft Formation תצורת גרופית		
	LOWER תחתון	TURONIAN טורון		Kuge	133		Ora Formation תצורת ארה	KURNUB כרנב
				Kuo	104		Hazera Formation תצורת חצרה	
				Kuh	126		Samar Formation תצורת סמר	

Limestone גי	Dolomite דולמיט	Chalk קצטן	Marl תער	Gypsum גבס	Chert צ'רט	Conglomerate קונגלומרט	Clay חריט	Sand חול	Gravel חלקים
Alluvium אלובים	Fossiliferous מאובנים	Laterite לטרט	Phosphorite פוספוריט						

איור 2: חתך סטריגרפי באזור גליון הר שגוב (משב ובייט, 2000)

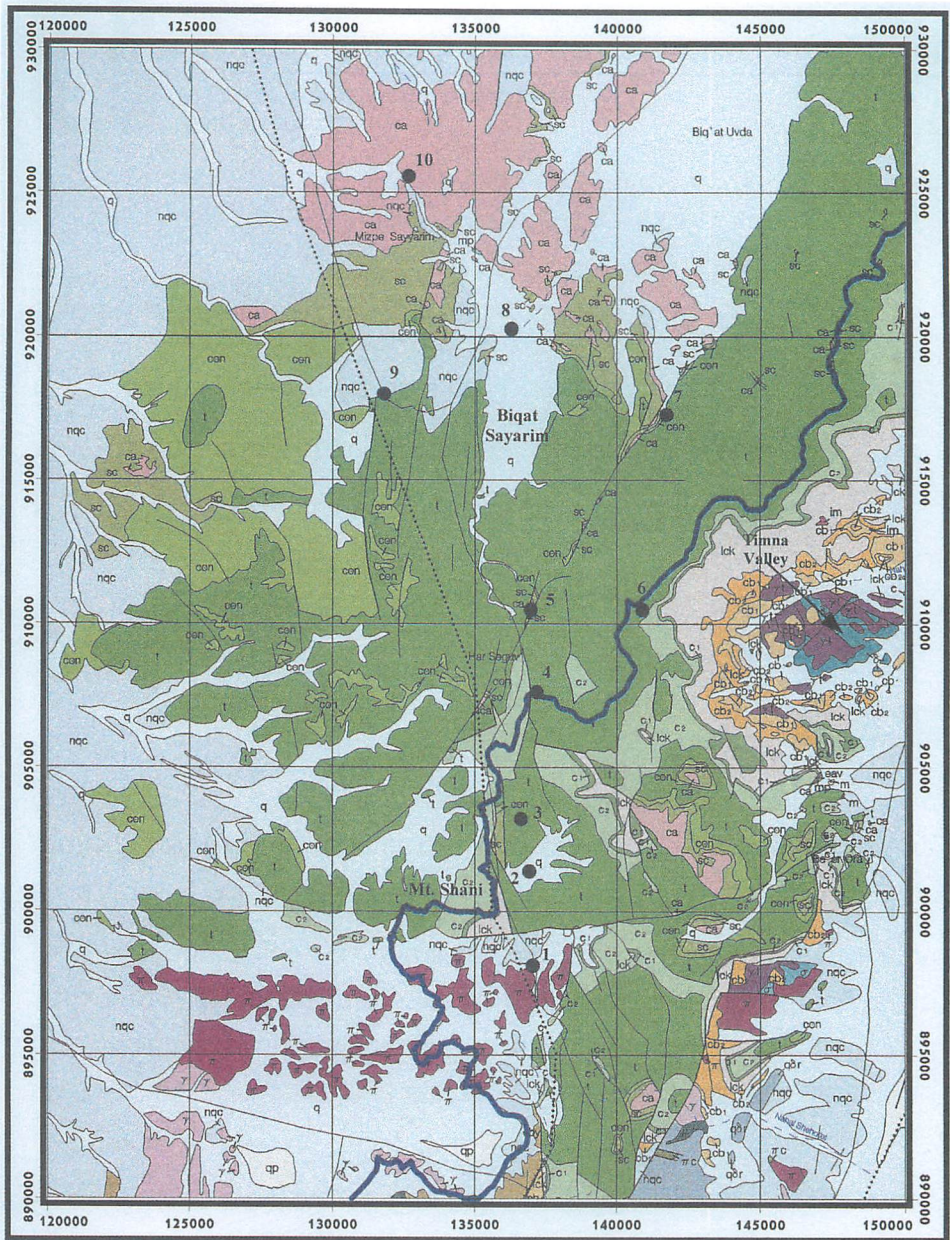


Fig 1. Location Map - Geological Map of Israel 1:200,000 sheet 4 (Sneh et al. 1998)

 Watershed ● Station

קו פרשת המים המבדיל בין אזור זה לערבה הדרומית מצוי לאורך מצוק ההעתקים (איור 1). בשולי הערבה לאורך מצוק ההעתקים ובמיוחד בבקעת תמנע נחשפים סלעים ממגוון רחב מאוד



מטרות הסיוור

1. מאפייניהן הגיאולוגים של יחידות הנוף השונות בנגב הדרומי.
2. תופעות סטרוקטורליות ומורפולוגיות לאורך העתק מלחן ובקעת סיררים.
3. מאפייני היחידות המורפוסטרוטיגרפיות בנגב הדרומי והיחסים בינן לבין התפתחות מערכות הניקוז מהפליקן ועד היום.
4. "דייקים" ובולבוסים גיר בתצורת מנוחה.

מבוא

החלק הדרומי ביותר של מדינת ישראל כולל את אזור הרי אילת, אזור הנגב הדרומי והערבה הדרומית. שלושה אזורים גיאוגרפים הנבדלים בניהם במאפייני הנוף, במערכות הניקוז ובמבנה הגיאולוגי (איור 1).

בהרי אילת נחשף מגוון רחב מאוד של יחידות סלע מסלעי התשתית הפרהקמברית ועד לסלעי משקע יבשתיים צעירים הנוצרים כיום. חשיפה זו ויצירת קווי פרשות המים העיקריים הינם בזכות פעילותם של העתקי השוליים של בקע ים המלח. הנחלים באזור מתנקזים מזרחה לכיוון הערבה הדרומית ומפרץ אילת. העתק תמד, שלאורכו זורם נחל שני, מפריד בין אזור הרי אילת לאזור הנגב הדרומי.

רכסי הר שגוב, הר בשמת והר ברך שגובהם מגיע ל-850 מטר מצויים בחלקו הדרומי של הנגב הדרומי ומהם מתנקזים המים אל הבקעות סיררים ועובדה. בשטח חשופים בעיקר סלעי משקע ימיים מחבורות יהודה והר הצופים (איור 2). בקעת סיררים מתנקזת דרך נחל בקעתיים לכיוון בקעת עובדה וזו מתנקזת דרך נחל חיון לכיוון צפון אל ים המלח. השיפוע הרגיולי של הסלעים באזור הינו 3-5 מעלות לכיוון צפון מערב. השיפוע הטופוגרפי הממוצע של האזור הינו מעלה אחת לאותו כיוון. לפיכך ככל שנתקדם צפונה בנגב הדרומי יחשפו לעניינו יחידות סלע צעירות יותר.

- Lambeck, K., and Nakada, M., 1992. Constraints on the age and duration of the last interglacial period and on sea-level variations. *Nature*, 357:125-128.
- Moustafa, Y. A., Pätzold, J., Loya, Y., and Wefer, G., 2000. Mid-Holocene stable isotope record of corals from the northern Red Sea. *International Journal of Earth Sciences*, 88:742-751.
- Nakada, M., Kimura, R., Okuno, J., Moriwaki, K., Miura, H., and Maemoku, H., 2000. Late Pleistocene and Holocene melting history of the Antarctic ice sheet derived from sea-level variations. *Marine Geology*, 167:85-103.
- Öztürk, H., Koral, H., and Geist, E. L., 2000. Intra-basinal water movements induced by faulting: the August 17, 1999, Gölcük (Izmit Bay) earthquake (Mw=7.4). *Marine Geology*, 170:263-270.
- Pirazzoli, P. A., 1991. *World atlas of Holocene sea-level changes*: Elsevier Oceanography Series, Elsevier, , 299 pp.
- Porat, N., Amit, R., Zilberman, E., and Enzel, Y., 1997. Luminescence dating of fault-related alluvial fan sediments in the southern Arava valley, Israel. *Quaternary Science Reviews*, 16:397-402.
- Shackleton, N. J., and Opdyke, N. D., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research*, 3:39-55.
- Shaked, Y., Cohen, C., Agnon, A., Lazar, B., Marco, S., and Stein, M., 2000. Beach sediments in Elat: Evidence for recent shoreline migration. In Baer, G. and Avni, Y. (Editors), *Israel Geological Society Annual Meeting, Ma'alot*, pp. 113.
- Shaked, Y., Agnon, A., Cohen, C., Lazar, B., Marco, S., Sass, E., and Stein, M., Submitted Oct. 2000. Late Holocene shorelines at the Gulf of Elat: Migrating shorelines despite tectonic and sea level stability. *EGS special issue*.
- Stein, M., Wasserburg, G. J., Aharon, P., Chen, J. H., Zhu, Z. R., Bloom, A., and Chappell, J., 1993. TIMS U-series dating and stable isotopes of the last interglacial event in Papua New Guinea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57:2541-2554.
- Strasser, A., and Strohmenger, C., 1997. Early diagenesis in Pleistocene coral reefs, southern Sinai, Egypt: response to tectonics, sea-level and climate. *Sedimentology*, 44:537-558.

- Edwards, R. L., Chen, J. H., and Wasserburg, G. J., 1987. ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81:175-192.
- Eisenhauer, A., Wasserburg, G. J., Chen, J. H., Bonani, G., Collins, L. B., Zhu, Z. R., and Wyrwoll, K. H., 1993. Holocene sea-level determination relative to the Australian continent: U/Th (TIMS) and ^{14}C (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 114:529-547.
- El-Asmar, H. M., 1997. Quaternary isotope stratigraphy and paleoclimate of coral reef terraces, Gulf of Aqaba, South Sinai, Egypt. *Quaternary Science Reviews*, 16:911-924.
- Enmar, R., 2000. Submarine diagenesis in reef corals-implications for geochemical parameters [M.Sc.]. Hebrew University (some good summaries of elat, corals, and the u-th system).
- Enmar, R., Stein, M., Bar-Matthews, M., Sass, E., Katz, A., and Lazar, B., 2000. Diagenesis in live corals from the Gulf of Aqaba. I. The effect on paleo-oceanography tracers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64:3123-3132.
- Enzel, Y., Amit, R., Porat, N., Zilberman, E., and Harrison, B. J., 1996. Estimating the ages of fault scarps in the Arava, Israel. *Tectonophysics*, 253:305-317.
- Fairbanks, R. G., 1989. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342:637-642.
- Fleming, K., Johnston, P., Zwart, D., Yokoyama, Y., Lambeck, K., and Chappell, J., 1998. Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. *Earth and Planetary Science Letters*, 163:327-342.
- Friedman, G. M., 1965. A fossil shoreline reef in the Gulf of Elat (Aqaba). *Israel Journal of Earth Sciences*, 14:86-90.
- Garfunkel, Z., 1970. The tectonics of the western margins of the southern Arava (a contribution to the understanding of rifting) [Ph.D.]. Hebrew University
- Garfunkel, Z., Zak, I., and Freund, R., 1981. Active faulting in the Dead Sea Rift. *Tectonophysics*, 80:1-26.
- Gvirtzman, G., 1994. Fluctuations of sea level during the past 400 000 years: the record of Sinai, Egypt (northern Red Sea). *Coral Reefs*, 13:203-214.
- Gvirtzman, G., Kronfeld, J., and Buchbinder, B., 1992. Dated coral reefs of southern Sinai (Red Sea) and their implication to late Quaternary sea levels. *Marine Geology*, 108:29-37.

- Al-Rifaiy, I. A., and Cherif, O. H., 1988. The fossil coral reefs of Al-Aqaba, Jordan. *Facies*, 18:219-230.
- Amit, R., Zilberman, E., Enzel, Y., and Porat, N., 1998. A multiple-event graben system deforming a Holocene alluvial fan: evidence for strike-slip faulting - southern Arava valley, Dead Sea transform, Israel. In Shapira, A. (Editors), 16 general assembly of the ESC, Tel Aviv, .
- Amit, R., Zilberman, E., Porat, N., and Enzel, Y., 1999. Relief inversion in the Avrona Playa as evidence of large-magnitude historical earthquakes, Southern Arava Valley, Dead Sea Rift. *Quaternary Research*, 52:76-91.
- Avner, U., Carmi, I., and Segal, D., 1994. Neolithic to Bronze Age settlement of the Negev and Sinai in light of radiocarbon dating: a view from the Southern Negev. In: Bar-Yosef, O. and Kra, R. S. (Editors), *Late Quaternary chronology and paleoclimats of the Eastern Mediterranean*. Tucson, pp. 265-300.
- Ben-Avraham, Z., and Tibor, G., 1993. The northern edge of the Gulf of Elat. *Tectonophysics*, 226:319-331.
- Bowman, D., and Gerson, R., 1986. Morphology of the latest Quaternary surface-faulting in the Gulf of Elat region, Eastern Sinai. *Tectonophysics*, 128:97-119.
- Chappell, J., 1974. Geology of coral terraces, Huon Peninsula, New Guinea: A study of Quaternary tectonic movements and sea-level changes. *Geological Society of America Bulletin*, 85:553-570.
- Chen, J. H., Curran, H. A., White, B., and Wasserburg, G. J., 1991. Precise chronology of the last interglacial period: ^{234}U - ^{230}Th data from fossil coral reefs in the Bahamas. *Geological Society of America Bulletin*, 103:82-97.
- Cohen, C., Shaked, Y., Sass, E., and Lazar, B., 2000. Beachrocks in Elat as sea level indicators. In Baer, G. and Avni, Y. (Editors), *Israel Geological Society Annual Meeting*, Ma'alot, Israel, pp. 26 .

בסיוור הצגנו את מערכת שוניות האלמוגים של אילת ואת התכונות בהן ניתן להשתמש בשחזורים פלאוגיאוגרפיים, וטקטוניים. בעזרת שוניות מאובנות קבענו את מפלס הים ההולוקני המקסימלי והמשכנו לשחזר בעזרת שוניות ועדויות נוספות שלבים בהתפתחות חוף המפרץ בהולוקן המאוחר.

השאלות הפתוחות והתצפיות הדורשות מענה עדיין רבות. למרות זאת מוצע כאן מודל ראשוני המתאר שלבים עוקבים בהתפתחות קו החוף דרומית לאילת, ומבוסס על התצפיות אותן הצגנו בסיוור:

(1) שוניות חוגרות מתפתחות סביב המפרץ לפני 4,000-6,500 שנה, בעקבות הפשרת הקרחונים, עליית מפלס-הים, והתייצבותו במקסימום ההולוקני (+1 מ'~).

(2) ירידה הדרגתית של מפלס-הים בשיעור של כמטר; השוניות ההולוקניות הקדומות נחשפות לבליה ולכיסוי על ידי סדימנטים קלסטים, שוניות צעירות יותר מתפתחות מזרחה בהתאם למפלס החדש.

(3) לפני ~2,500 שנה שונות אלמוגים מול חוף שמורת האלמוגים של אילת נחשפת מעל לפני הים, אם כתוצאה מירידת מפלס או אולי כתוצאה מהתרוממות קדם-סייסמית. השונות עוברת גידוד ובנה עליה האתר הארכאולוגי.

(4) רעידת אדמה לפני 2,000-2,500 שנה (על מישור העתק העובר תחת השונות המודרנית, איור 7) מורידה את השונות המגודדת ואת האתר שעליה כארבעה מטרים תחת מפלס הים. הרעידה גורמת לשינוי בגיאומטריית החוף ואולי אף לגלים חריגים הכלואים בין שולי המפרץ הצר (דוגמת הרעידה של איזמיט, 1999 (Öztürk et al., 2000), וגורמת לקבורת השונות בחוף המעבדה על ידי סדימנטים חופיים.

(5) התפתחות השונות המודרנית על גבי השונות המגודדת (ומישור ההעתק?), נסיגת קו החוף במעבדה הימית מזרחה והתפתחות אופק סלעי-חוף בתת הקרקע, בגובה מפלס-הים הנוכחי.

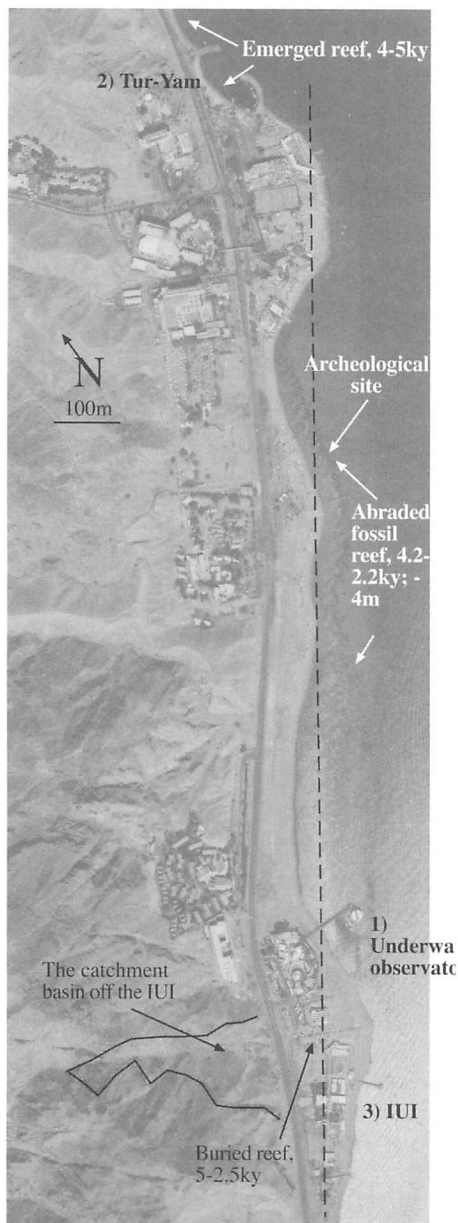
רעידת האדמה המכרת בשלב 4 הינה אירוע יוצא דופן במפרץ, בעלת מרכיב אנכי של 3-4 מטרים המזוהה מול חוף שמורת האלמוגים. רעידות כאלה כנראה נדירות יותר ואולי חזקות יותר מהרעידות בעלות התנועה האופקית בעיקר (דוגמת נואיבה 1995), ונראה שהן המעצבות את המורפולוגיה של המפרץ.

ניתן אם כן לשחזר את התפתחות קו החוף באזור המעבדה הימית בהולוקן לסדרת אירועים הכוללים (Shaked, et al., 2000, Shaked, et al., Submitted Oct. 2000): 1) התפתחות שונית חוגרת בסמוך לגבעות התשתית מלפני כ-5,000 שנה. 2) קבורה פתאומית ומהירה של השונית על ידי סדימנטים קלסטים. 3) נדידת קו החוף במעבדה בשיעור של למעלה מ-100 מ'.

ב. שחיה בים, שטרקלים

נתחיל מגבולה הצפוני של המעבדה ונעבור דרומה לאורך החוף (איור 6). הכניסה למים בחלק הצפוני כוללת מעבר מהחוף המורכב סדימנטים קלסטים לא מלוכדים (רכס חוף המייצג אירועי סערה מספר מטרים מקו המים, רכס חוף פעיל קרוב יותר לקו המים), דרך רצועה של סלעי חוף מקו המים לעומק של כמטר (תלוי במצב הגאות), לקרקע המורכבת מסדימנטים קלסטים לא מלוכדים בגודל חצץ. שיפוע הקרקע מתון עד עומק 2-3 מ' ובעומק זה נראה שינוי חד בשיפוע המדרון ההופך תלול מאד ($\sim 30^\circ$). מדרון זה נמשך עד לעומק של 40 מ'. כיסוי האלמוגים בחלק זה דליל. נשחה דרומה, עוקבים אחר הקו המסמן את השינוי בשיפוע המדרון. הקו מעמיק תחתינו ומרחיק אותנו מהחוף. עם ההתקדמות דרומה כמות האלמוגים על המדרון גדלה. מול מזח המעבדה השינוי בשיפוע המדרון בעומק של ~ 6 מ' והמדרון מכוסה מושבות אלמוגים קטנות ומבודדות. הלאה דרומה השינוי בשיפוע מגיע לעומק של ~ 7 מ', והמדרון המתון (הרדוד) מורכב מרצועות של סלעים קלסטים מלוכדים. ריכוז האלמוגים גדל והם מכסים גם את המדרון התלול. 100-50 מ' דרומה מהמזח השינוי בשיפוע נמצא בעומק מקסימלי (~ 9 מ'), וגם מהמדרון התלול מבצצים מחשופים של סלעים מלוכדים המהווים מצע להתיישבות אלמוגים. המחשוף העמוק ביותר של סלעים אלה נמצא בעומק של ~ 22 מ'. מכאן נפנה לשחות מערבה, בכיוון החוף, הקרקעית תחתינו מורכבת מרצועות מקבילות של סדימנטים מלוכדים - סלעי חוף - נטויות כלפי מזרח, עליהן התנחלו אלמוגים. ניתן להתרשם משכבות סלעי החוף הנטויות בדרכנו חזרה צפונה אל מזח המעבדה ממנו נצא מהמים; יציאה אל החוף בחלק הדרומי של המעבדה כרוכה במעבר בין אלמוגים וקיפודים: סכנה לסביבה ולאדם.

רצועות סלעי החוף תחת המים מהוות שאלת מחקר פתוחה: יתכן והם מייצגים אופק אחד אשר הבסיס הלא מלוכד מסולק מתחתיו והוא נשבר לרצועות הנופלות בנטייה חריפה מזרחה (דוגמה פעילה לכך ראינו בתחנה 2, כיסוי סלע החוף מעל השונית המאובנת). יתכן גם שהן מייצגות מחוזים של רעידות אדמה אשר גורמות לשקיעה והטיה של החוף ובעקבותיהן מתפתח אופק סלעי-חוף חדש. אפשרות שלישית היא שרצועות בעומקים שונים מייצגות מפלסים-שונים בתהליך עליית המפלס בעקבות הפשרת הקרחונים. נמדדו מספר גילי פחמן 14 ואורניום-תוריום של צמנטים מסלעי חוף בעומקים שונים. שני גילים מאופק סלעי החוף המודרני הם 3.3 ו-2.7 אלף שנה. גילים משכבות עמוקות יותר נפרסים מ-700 שנה ועד 7,000 שנה, אולם אינם עוקבים אחר המיקום הסטרטיגרפי. נדרשת עבודה נוספת לפני שנוכל לדון בשאלת סלעי החוף.



הגלים. שתי תעלות שנחפרו מהחוף מערבה חשפו תחת פני השטח סידרה של סדימנטים חופיים ותחתם אופק רציף של סלעי חוף הנמשך לפחות 100 מ' מערבה מקצהו החשוף בקו החוף (Cohen, et al., 2000, Shaked, et al., 2000). אופק סלעי החוף בתת הקרקע חוצה את המבנים הסדימנטריים החופיים, ובזמן גאות נמצא אופק זה באזור הרחבי במים. בחינה של הליכוד הקרבונטי המלכד את הסדימנטים החופיים ליצירת שכבה קשה מלמדת שתהליך הצמנטציה עודנו פעיל בחלקה העליון של השכבה ומקורו בערבוב מי ים עם מי תהום באזור הפן הביני. תצפיות אלה נתמכות על ידי אנליזה של הרכבי המים בתת הקרקע. המסקנות הנובעות מכך: (1) סלעי החוף באילת נוצרים בתת הקרקע במפלס פני הים, ולא בקו החוף עצמו; (2) מחשופי סלעי חוף מעידים על אירוזיה חופית; (3) הלשון הסדימנטרית עליה בנויה המעבדה מייצגת התקדמות קו החוף מזרחה בשיעור העולה על 100 מ'.

בחפירות וקידוחים 100-90 מ' מערבית לקו החוף נמצאו אלמוגים קבורים בסדימנטים קלסטים תחת אופק סלעי החוף. אלמוגים קבורים תוארכו ל 5,000~שנה (Enmar, 2000, Moustafa, et al., 2000), והתקבל גם גיל של 2,500 שנה מאחד האלמוגים (עבודה זו). מצב השימור היוצא מן הכלל של האלמוגים הקבורים מעיד על אירועי קבורה פתאומיים ומהירים.

Figure 7: Aerial photo of the coast south of Elat showing the three stops of the trip and the features discussed. Emerged reef is the Holocene reef recording the Holocene sea level maximum. Archeological site submerged under 4m of water off the modern reef. Abraded fossil reef is the reef flat found under 4m of water, over which the archeological site was built, and the modern reef developed. Also shown west the IUI/observatory sediment prism the catchment basin of the only river outlet facing this prism. This is clearly too small to supply the sediments needed to bury the Holocene reef and prograde the shore by 100m. Finally, marked by a broken line is the proposed location of the inferred fault that dropped the Holocene 4-2 ky reef by 4m. Notice the light color of the water parallel to the shore at this location.

תחנה 2 מעגנת סידות הזכוכית 'טור-ים'. כשלושה קילומטרים צפונה מהמצפה על הכביש לאילת.

בתחנה זו נראה שונית חוגרת מאובנת מכוסה בסלעי חוף הנחשפת בקו המים. השונית מכוסה מים בזמן גאות אולם נמצאת מעל המים בזמן שפל. קיר השונית, עד עומק כמטר וחצי, גדל על גבי סדימנטים קלסטים (סלעי חוף?) ומהווה את קו החוף בזמן שפל. שולחן השונית מבצבץ מבעד לכיסוי סלע החוף העובר תהליכים של אירוזיה. ניתן לזהות אלמוגים שלמים בתנוחת גילה המעידים על שלמותה של השונית באתרה. מצב דומה, של שונית אלמוגים מכוסה בסלעי חוף החשופה בקו המים סביב המפרץ, מוכר גם מדרום סיני ומירדן (דרומית לעקבה). בסיני נמצא גיל השונית 4-6 אלפים שנה (El-Asmar, 1997, Gvirtzman, et al., 1992), ובעקבה נקבע גיל דומה על סמך קורלציה של טרסות מורמות (Al-Rifaiy and Cherif, 1988). השונית אותה אנו רואים נחקרה ותוארכה על ידי (Friedman, 1965) אשר מצא שהרכבה הכימי זהה לזה של שוניות מודרניות, ושגילה 4.7 אלפי שנים. אנו דגמנו את השונית וכן את המשכה הצפוני בחוף קצא'א, ותארכנו דוגמאות לא מוחלפות ממנה בשיטת אורניום-תוריום. התקבלו גילים של 4,800 שנה מכאן, ו 4,200 שנה מהשונית בקצא'א. מציאותן של שוניות אלמוגים מאובנות בגובה דומה מגיל 5,000~ שנה לאורך חופי המפרץ שוללת את האפשרות שהשוניות נחשפו בעקבות פעילות טקטונית, ומובילה אותנו למסקנה שהן גדלו בזמן שמפלס הים היה גבוה מהמפלס הנוכחי בכמטר (הפרש הגובה בין שוניות אלה לגובה שולחן השונית בשוניות מודרניות).

אם כך, יש בידינו עדות גיאולוגית ישירה למפלס הולוקני גבוה במפרץ אילת לפני כ 5,000 שנים (איור 2). למפלס זה נוכל להשוות את שאר הממצאים. המסקנה הראשונה הנובעת מקיומו של המפלס הזה לאורך חופי המפרץ היא העדר הרמה והטיה משמעותית של חצי האי סיני כלפי צפון כבלוק אחד צפיד. הטיה שכזו, באם קיימת, הינה קטנה מיכולת המדידה שלנו (פחות מחצי מטר ב 5,000 השנים האחרונות).

תחנה 3 מעבדה ימית. שלושה וחצי ק"מ דרומה מתחנה 2, בכיוון טאבה.

(א) חוף המעבדה

המעבדה הימית, המהווה מרכז לחקר מפרץ אילת, בנויה במקום בו קו החוף מתרחק מגבעות התשתית המקיפות אותו ונוצרת לשון סדימנטרית דמוית מניפה הבולטת לים. המעבדה אינה נמצאת בפתחו של אגן ניקוז משמעותי (איורים 6,7). בחוף חשופים סדימנטים קלסטים המעוצבים על ידי הגלים, ואילו מבני המעבדה בנויים על מצע מעובד ומיושר של סדימנטים דקים. קו החוף ובעיקר המפנה הדרומי, מחוף המעבדה ודרומה, עטור סלעי חוף החשופים למפץ

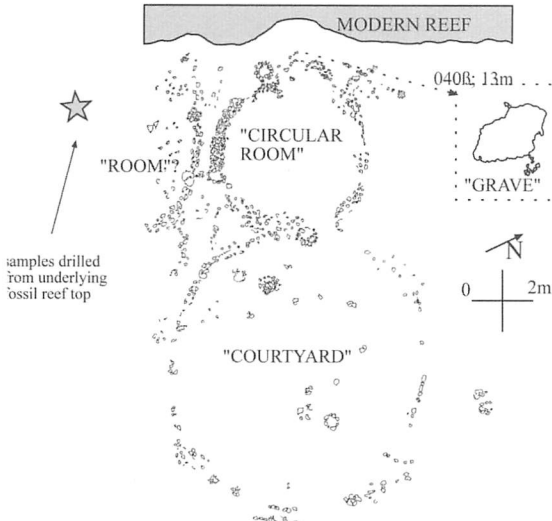


Figure 5: Plan map of part of the submerged archaeological site. The site is of the circular type with a built courtyard. Such sites began to appear in the region 8,000 to 5,000 years before present. At present it is submerged under 4 meters of water.

מכסים אלמוגים את המדרון אך אינם יוצרים שונית כמו זו של חוף אלמוג. בנוסף לכך, משטחים של סלעי חוף עוטרים את המפנה הדרומי, מול המעבדה, אך כמעט ואינם במפנה הצפוני, מול המצפה (איור 6). נוצר רושם שתנועת סדימנטים קלסטים בחלק המדרון הפונה צפונה קברה את קצה השונית הדרומי, או לפחות מונעת התפתחות השונית וחשיפת סלעי חוף בכיוון זה. רושם זה מתחזק כאשר צוללים ומתבוננים במדרון התת-ימי: המפנה הצפוני מאופיין במדרון תלול של חלוקים טריגנים לא מלוכדים, ללא כיסוי של אלמוגים, ואילו במפנה הדרומי המדרון הרדוד מתון יותר וחשופים בו סלעים קלסטים מלוכדים המהווים מצע טוב לגידול אלמוגים. פרטים אלה נראה בהמשך הסיוור, בשנירקול מחוף המעבדה הימית.

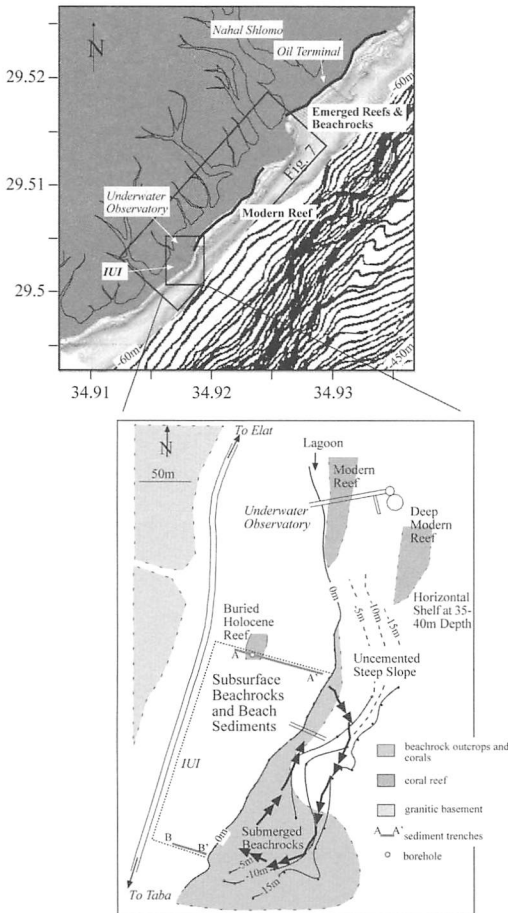


Figure 6: A) Map of the coast south of Elat showing the coastline, major drainage basins, offshore bathymetry, emerged reefs and beachrocks, and the modern reef where a fault is inferred. B) Map of the IUI/observatory sediment prism and its off-shore features. Just south of the reefs the slope is unconsolidated and steep and beachrocks are not found. Off the IUI beachrocks outcrop on the shoreline and to a depth of 22m. Beachrocks also underly the surface on shore. The locations of trenches and the buried reef are shown. The planned swimming route in the trip is marked in bold arrows.

(Shallow bathymetry measured by: M. Reidenbach, D. Fong, A. Genin, G. Yahel, Y. Shaked, A. Agnon, June, 2000, deep bathymetry from Ben-Avraham & Tibor, 1993)

לאצות השיתופיות שבאלמוגים. תהליכי הדיאגנזה בשונית נחקרו באלמוג מסיבי מסוג (Porites) הנראה בתצפית כלפי מערב מחלקו הצפוני של המצפה. תהליכים אלו משנים את הרקוד הגיאוכימי המקורי שבשלב האלמוג (Enmar et al., 2000).

ג) גג המצפה

במבט מלמעלה כלפי צפון ניתן לראות את ההשתרעות המרחבית של השונית המודרנית של אילת. השונית עוקבת אחר קו החוף לאורך כקילומטר וחצי, הינה ברוחב של כחמישה עשר מטרים, והיא מופרדת מהחוף על ידי לגונה צרה ורדודה (עומק של עד כשני מטרים) הצוברת סדימנטים קלסטים על גבי משטח גירי קשה. קו החוף עטור בסלעי חוף ברוחב של מטר עד שניים. שולחן השונית בעל הצורה המשוונת (spurs & grooves) מתפתח בעומק של כחצי מטר ממפלס הים הממוצע ומפריד בין הלגונה לקדמת השונית והים הפתוח. לפי הבדלים בצבע המים ניתן לראות שקידמת השונית נשענת על משטח רדוד אופקי למדי (עומק 3-4 מטרים). משטח זה משתרע מזרחה כשלושים מטר, שם ניכר בצבע הים שינוי בנטיית המדרון הגורם להעמקה של המפרץ. על גבי המשטח האופקי בין שני גשרי השמורה בסמוך לשונית, נמצא אתר ארכיאולוגי. האתר, אשר התגלה על ידי הארכיאולוג עוזי אבנר, בנוי מאבני תשתית ומכיל את שרידיהם של חדרים וחצרות מעוגלים וכן מספר מתקנים קטנים (איור 5). אתרים כאלה נפוצו באזור לפני כחמשת אלפים שנה, והקדום ביותר מגיל שמונת אלפים שנים (Avner, et al., 1994). אין עדיין בידינו גיל מהימן לאתר זה. המשטח האופקי עליו גדלה השונית המודרנית, ועליו נמצא האתר, הינו שולחן שונית מגודל המכוסה כיסוי דק של סדימנטים קרבונטים. דוגמאות מאלמוגים ארגוניטים שנקדחו מתוך המשטח תוארכו ל 2,200-4,200 שנה בשיטות אורניום-תוריום ופחמן 14.

גיל שולחן השונית המגודד עשוי להצביע על אירוע של שבירה והעתקת שונית הולקנית צעירה כלפי מטה לפני כאלפיים שנה. השונית המודרנית צמחה על גבי המשטח המועתק לאחר אירוע זה. יתרה מכך, יתכן ומיקומה של השונית המודרנית, בסמוך לחוף אך לא צמוד אליו, מוכתב על ידי מדרגה טופוגרפית שהיא תוצר ההעתקה. חיזוק לכך ניתן על ידי הבדלי העומקים בין המצע הקשה ממנו עולה קידמת השונית (~4 מ') והמצע הקשה עליו נצברים הסדימנטים הלגונריים, אשר נמצא בעומק 2-3 מ' תחת פני הים. לחילופין יתכן כי האלמוגים אותם בחרנו לתארך, אלמוגים ארגוניטים לא מוחלפים, הינם מתיישבים מאוחרים על גבי שולחן שונית עתיק יותר. דרשים גילים מדוגמאות נוספות על מנת להכריע שאלה זו בוודאות.

במבט דרומה רואים את השונית המודרנית פוגשת את קו החוף עליו בנויים המצפה התת-ימי והמעבדה הימית. השונית אינה עוקבת אחר קו החוף המתעקל למבנה דמוי מניפה, אלא נמרת אליו. המפנה הצפוני של המדרון, מול המצפה, נעדר אלמוגים רדודים ואילו מול המעבדה הימית

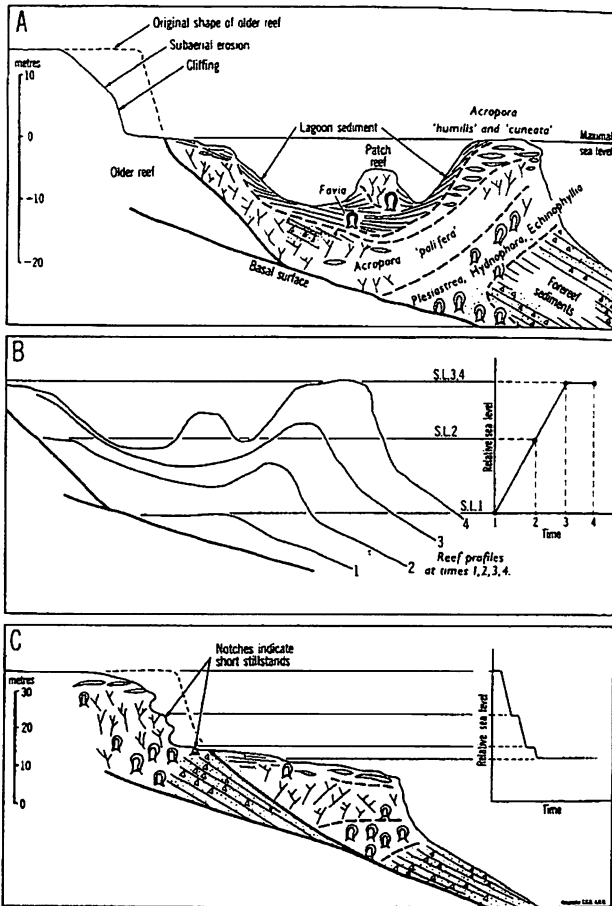


Figure 4: Reef growth during sea level change (From Chappell, 1974). A) Sea level drop, reef propagates seaward and to lower elevations, over older forereef sediments. The older reef is exposed to subaerial erosion. B) Sea level rise, followed by sea level stability. Reef grows to follow the rising sea level. C) Reef morphology following a sequence of sea level drops and standstills.

הרישום הגיאולוגי אשר מותירה השונית מתבטא במורפולוגיה האופיינית, ובסדימנטים אופייניים. הלגונה מותירה סדימנטים קרבונטים חוליים משוכבים אופקית, עם שלדי צדפות, אלמוגים בודדים ועוד. אחורי השונית (back-reef) מהווים מחסום קשה המפריד בין הסדימנטים הדקים של הלגונה ומבנה השונית המסיבי. שולחן השונית בעל מורפולוגיה שטוחה, פרוזית, בנוי בעיקרו שלדי אלמוגים. קידמת השונית היא מצוק אנכי ולמרגלותיו שכבות נטויות של חלקיקי שונית גסים. אזורים אלה ניתן לזהות גם בשונית מאובנת המצויות ברישום הגיאולוגי.

היכרות עם צורת השונית ועם התנאים החיוניים להתפתחותה, וכן מעט מהתהליכים הדיאגנטיים המתרחשים בה, נותנים בידינו כלי

ממדרגה ראשונה לחקר תהליכים גיאולוגים ואוקיינוגרפים באזור המפרץ.

ב. המצפה התת-ימי, למטה

בתצפית התת-ימית אפשר להבחין בקדמת השונית ובמדרון השונית ממערב, ובשיפוע החריף של מדרון השונית מתחתינו ולכיוון מזרח. בתצפית נבחין בטיפוסים העיקריים של אלמוגי האבן, סביבות אופייניות בשונית כגון מערות, ודרך התזונה של בעלי החיים הססילים בשונית (סינון). תרומת הדגים למארג המזון בשונית חשובה ביותר, כיוון שחלקם אוכלים פלנקטון מגוף המים ומפרישים אמוניה שהינה מקור חנקן חשוב

1. המצפה התת-ימי
2. מעגנת סירות זכוכית (טור-ים)
3. המעבדה הימית

1 תחנה המצפה התת-ימי כשמונה קילומטרים דרומית לעיר אילת, על הכביש המוביל למעבר הגבול בטאבה.

א) גשר המצפה

שונית האלמוגים היא מבנה סלעי בולט בנוף התת-ימי, מורכבת בעיקרה מאלמוגים הרמטיפים, ומשמשת בית גידול למגוון עצום של מינים. חלק מהאורגניזמים המרכיבים את השונית ניתן לראות בעמדנו מעל השונית, על הגשר המוביל אל המצפה. כאמור, האורגניזם הבולט והחשוב הוא אלמוג האבן.

אלמוגי האבן הם בעלי סימטריה הקסגונולית (6), ונחלקים לשתי קבוצות עיקריות על סמך הופעתם: אלמוגים שיחניים להם ענפים דקים ומסועפים שהפוליפים שעל פניהם מסננים פלנקטון מהמים בזכות שטח הפנים הגדול; ואלמוגים מסיבים בעלי מבנה גושני העמיד יותר לפגיעה מכנית, אך יעיל פחות בסינון מזון. האלמוגים השיחניים לרוב גדלים מהר (קצב התארכות הענפים), אך נשברים בקלות. לאלמוגים המסיבים קצב גידול נמוך יותר. האלמוגים מתרבים בצורה א-מינית ובצורה מינית: על ידי פיצול תא לשניים במושבה קימת, ועל ידי שחרור פלנולות הנישאות במים ומתיישבות על מצע מתאים באתר חדש להקמת מושבה חדשה. השונית נתונה לתהליכי בניה (השקעת שלד) והריסה (בעיקר על ידי בליה ביולוגית ומכנית) מתמידים המעצבים את המבנה האופייני שלה.

שונית האלמוגים של אילת מאופיינת במורפולוגיה טיפוסית אשר חלקיה העיקריים הם (איור 3): לגונה (lagoon), שולחן השונית (reef-flat), קדמת השונית (reef-flat) ומדרון השונית (reef-slope). לכל חלק הפאונה האופיינית לו וכך גם הטיפוסים השולטים של אלמוגי האבן. שולחן השונית הרדוד, שעומקו הממוצע כחצי מטר, הוא המחסום העיקרי המפריד בין הים הפתוח ללגונה. האלמוגים המפותחים ביותר נמצאים בקדמת השונית באזור הנשטף על ידי הזרמים של הים הפתוח, דרכו עוברים זרמי הגאות והשפל, בו פוגעים הגלים ולכן אספקת המזון (פלנקטון) אליו גדולה. מדרון השונית מכוסה בחלקו בסלע שוניתי ובחלקו בסדימנטים קרבונטים קלסטים ממקור שוניתי.

ישנה חלוקה של סוגי שוניית על סמך המורפולוגיה: 1. שוניית מחסום - שוניית המופרדת מהחוף על ידי לגונה, 2. שוניית סלאי - מושבות מבודדות של אלמוגים, 3. שוניית חוגרת - צמודה אל החוף. השוניית במפרץ אילת הן שוניית חוגרת (איור 3). כל שוניית ניתן לחלק חלוקה מורפולוגית פנימית העוקבת גם אחרי התפלגות המינים בשוניית: הלגונה, אחורי השוניית, שולחן

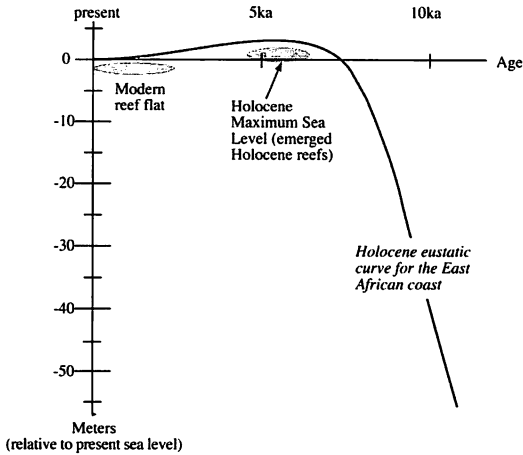


Figure 2: The sea level rise off the East African coast during the Holocene (from Pirazzoli, 1991, after Jartz et al. 1977). Ellipses mark our data from the Gulf of Elat confirming that a Holocene sea level maximum was attained here as well.

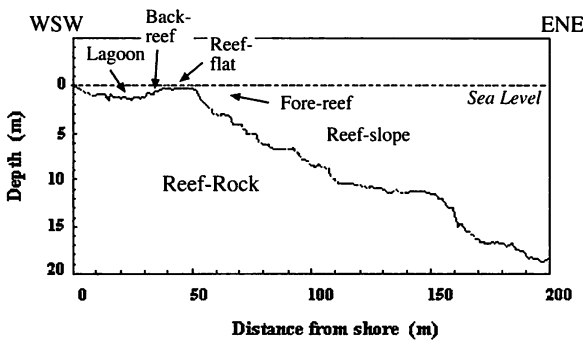


Figure 3: A cross-section of the modern reef of Elat, showing the typical morphology of a narrow lagoon, back-reef, reef-flat, and fore-reef. Further off shore the reef slopes towards the Elat Deep.

השוניית וקידמת השוניית. לאזורים אלה סממנים מורפולוגיים וטקסונומיים עליהם נעמוד בתחנה הראשונה של הסיור- המצפה התת-ימי של אילת.

חלוקת השוניית למבנים מורפולוגיים אותם ניתן לזהות גם ברישום הגיאולוגי מאפשרת שימוש בהן לשחזור תנועות יחסיות של ים ויבשה (איור 4): בזמן עליה יחסית של מפלס-הים השוניית גדלה כלפי מעלה בניסיון לשמור על מקומה במים דודים. בזמן בו פני הים יציבים השוניית, לאחר שצמחה עד לפני המים, מתחילה לגדול החוצה בכיוון הים הפתוח. כך שולחן השוניית הולך ומתרחב ובנה על גבי האזור שהיה לפניו בקדמת השוניית. בזמן ירידת המפלס השוניית מתקדמת לכיוון הים ואזורים קדומים בה נחשפים לבליה. גם במקרה זה נבנית השוניית על גבי הסדימנטים שהיו קודם בקדמתה. אחר תהליכים אלה ניתן לעקוב בגיאולוגיה, ולתארם בעזרת האלמוגים: יכולת תיארוך טובה בשיטת פחמן 14 או בסדרות האורניום (Chen, et al., 1991; Edwards, et al., 1987, Stein, et al., 1993).

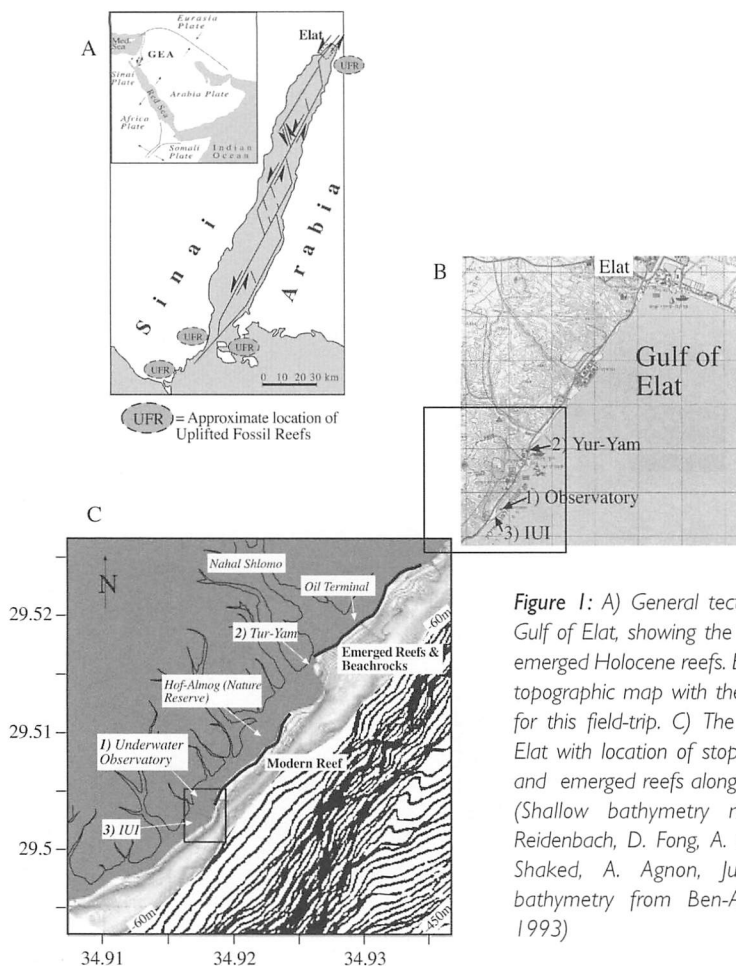


Figure 1: A) General tectonic setting of the Gulf of Elat, showing the locations of known emerged Holocene reefs. B) The coast of Elat, topographic map with the locations of stops for this field-trip. C) The coastline south of Elat with location of stops, and the modern and emerged reefs along the coast. (Shallow bathymetry measured by: M. Reidenbach, D. Fong, A. Genin, G. Yahel, Y. Shaked, A. Agnon, June, 2000, deep bathymetry from Ben-Avraham & Tibor, 1993)

ישן אצות גירניות ויצורים נוספים המשקיעים שלד קרבונטי, ואלה מלכדים את המבנה ליצירת שונית. שונית אלמוגים מקיימת בתוכה מגוון רב של מינים נוספים כגון דגים, רכיכות, וקוצי עור שכולם מפיקים תועלת ותורמים את חלקם למערכת.

שוניות האלמוגים המודרניות הן מערכות עדינות ומורכבות, ודרושים להן תנאי מחיה מיוחדים. שיתוף הפעולה בין אלמוגים לאצות מכתוב את התנאים האוקיינוגרפיים בהם השוניות מתפתחות: תאורה נאותה, מים צלולים ורדודים (עד לעומק של כ-100 מטרים בתנאים אופטימליים), ים אוליגוטרופי (עני בנוטריינטים) המונע תחרות עם אצות בנטוניות, מים חמים, טמפרטורת מינימום של כ-19°, מליחות ימית-גם במליחות גבוהה (41% באילת), אך לא במליחות נמוכה. מסיבות אלה תפוצתן של שוניות האלמוגים מוגבלת לימים טרופים בקווי רוחב נמוכים: עד כ-30° (איזותרמה של 20°), כאשר שוניות האלמוגים במפרץ אילת הן בגבול התפוצה הצפוני של כדור הארץ.

עד לפני כ-7,000 שנה (Fairbanks, 1989, Nakada, et al., 2000, Shackleton and Opdyke, 1973) עד זמן זה עלה מפלס הים בקצב של כסנטימטר בשנה. שוניות אלמוגים הולוקניות מגילים שונים ובגבהים שונים מסוף עליית מפלס מהירה זו נמצאו במקומות שונים בעולם (בקוי הרחב הנמוכים (Eisenhauer, et al., 1993, Fairbanks, 1989) הבדלי הזמן וגובה המפלס במקומות שונים לאחר הפשרת מרבית הקרחונים, מצביעה על אפקטים מקומיים של איזוסטזיה (אפקטים גלציו-הידרו-איזוסטטים) המשפיעים על המפלס המקומי באזורים שונים. קיימים היום מספר מודלים המטפלים באפקטים אלה וחוזים את המפלס האזורי בהתחשב במרחק מכיפות הקרח הנסוגות (Fleming, et al., 1998, Lambeck and Nakada, 1992, Nakada, et al., 2000), אולם אלה עדיין אינם מדויקים עבור כל מקום, ואין חישוב המטפל במפרץ אילת לשם שיחזור טקטוני. רצוי למצוא סמנים מקומיים למפלס הים אליהם נתייחס בשחזור הטקטוני.

בעזרת מחשופי שוניות הולוקניות מאובנות סביב המפרץ, אחד מהם נראה בתחנה השנייה של הסוור, הצלחנו לקבוע את מפלס הים הגבוה בהולוקן (כמטר מעל המפלס הנוכחי, לפני 4-6 אלפי שנים) (איור 2). בהתאם למפלס זה אנו משחזרים תנועות אנכיות ושינויים בקו החוף בהולוקן, מתוך עדויות של סדימנטים חופיים קלסטים, אתר ארכאולוגי שקוע תחת המים, ושוניות אלמוגים מאובנות. על מנת להשכיל ולהבין כראוי את הממצאים דרוש שיתוף פעולה עם מחקרים הנוגעים למערכת השונית ולתנאים האוקיינוגרפיים באילת. סוור זה בא להציג את האזור החופי של אילת, את השוניות העוטרות אותו, ואת השילוב בין הידע הנצבר בנושאים אלה ובין שיחזור טקטוני של התפתחות קו החוף.

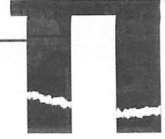
יש צורך בהבנה בסיסית של מערכת השונית לשם שימוש בכלי זה לצרכים טקטוניים. לשם כך מובא כאן רקע קצר על שוניות

שוניות אלמוגים

בכלל ושוניות במפרץ אילת בפרט:

שוניות אלמוגים הן מהבולטות ביצרני הסלעים בסביבה הימית, ומאופיינות בקצב סדימנטציה גבוה ביותר. תוך כדי גדילתה השונית יוצרת סלע קשה ומספקת סדימנטים קלסטים לסביבתה הקרובה. שוניות נשמרות היטב ברקוד הגיאולוגי, ולכן ניתן להיעזר בהן לשחזורים פלאוגאוגרפיים. על מנת לעשות זאת, יש ללמוד מהם היצורים בוני השוניות של היום ואיזה תנאים הם מייצגים.

האלמוגים בוני השוניות נקראים אלמוגים הרמטיפיים (Hermatipic Corals) והם מערכת שיתופית מורכבת של אלמוגים ואצות החיות בתוכם. שיתוף הפעולה בין אלמוגים ואצות מיעל את המנגנון המטבולי של ניצול נוטריינטים וייצור אנרגיה, אך מגביל את טווח המחיה של אלמוגים אלה לעומקים בהם פוטוסינטזה אפשרית (האזור הפוטי). רוב אלמוגי האבן הם מושבות של פוליפים רבים (החלק החי באלמוג). בין מושבות האלמוגים, אבני הבניין של השונית,



מדריכים: יונתן שקד¹, בועז לזר²
שותפים במחקר: אמוץ עגנון¹, שמוליק מרקו²,
מוטי שטיין¹, כרמית כהן¹, איתן שש¹

1. המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים
2. המחלקה לגיאופיזיקה ומדעים פלנטריים, אוניברסיטת תל-אביב

מטרות הסיוור

1. הכרת מערכת שוניות האלמוגים באילת כסמן בשחזורים פלאוגאוגרפיים.
2. שיחזור התפתחות קו החוף של אילת בהולקן המאוחר בעזרת שוניות ועדויות נוספות.
3. הצעת מודל לפיו רעידת אדמה בעלת תנועה אנכית גדולה, אירעה באזור אילת לפני 2,200-2,500 שנה.

מבוא

מפרץ אילת הוא שקע מורפוטקטוני בולט בקצה הדרומי של מערכת טרנספורם ים המלח (איור 1). עיקר התנועה במערכת היא אופקית-שמאלית, אולם קיומו של המפרץ מעיד על מרכיב חשוב של תנועה אנכית. העדויות הגיאולוגיות לתנועה אנכית פעילה ניכרות בחלקו הדרום-מערבי (סיני) והצפון-מזרחי (עקבה) של המפרץ, באמצעות סדרות מדורגות של שוניות אלמוגים מורמות (Al-Rifaiy and Cherif, 1988, El-Asmar, 1997, Gvirtzman, et al., 1992, Gvirtzman, 1994, Strasser and Strohmenger, 1997). בחלקו הצפון-מערבי של המפרץ (אזור אילת), תנועות אנכיות מגיל פליוקן-פלייסטוקן ניכרות על העתקי שוליים מחוץ למפרץ (Bowman and Gerson, 1986, Garfunkel, 1970, Garfunkel, et al., 1981). ועדויות לתנועות צעירות יותר נמצאו בערבה (Amit et al., 1998, Amit, et al., 1999, Enzel, et al., 1996, Porat, et al., 1997). עדויות לתנועה אנכית הולקנית באזור מצאנו בתוך המפרץ, תחת המים. נראה שבאזור אילת התנועה האנכית בשולי המפרץ היא תנועה של שקיעת החוף. על מנת לעקוב אחר תנועה זו ובניסיון לתארך ולכמת אותה, אנו תרים אחר סמנים אופקיים אשר ניתן לקבוע את גילם ומיקומם האנכי בזמן היווצרותם, ומשווים זאת עם מיקומם הנוכחי. הסמנים המתבקשים הם סמנים למפלס הים: טרסות ימיות ושוניות אלמוגים. שימוש בעדויות למפלס הים לצורך שיחזור של תנועות טקטוניות מחייב הפרדה בין המרכיב הטקטוני לשינויים במפלס הים עם הזמן.

בסוף תקופת הקרח האחרונה, לפני כ-18 אלף שנים היה מפלס הים העולמי נמוך בכ-120 מטרים מהמפלס של היום. ידוע שרוב נפח המים האגור בקרחונים חזר אל הימים במהירות רבה,

- Morsy, A.M., Kelling, G., El-Ghawaby, M.A. and El-Fawal, F.M., 1993. Sedimentology of the pre-Cenomanian succession, east-central Sinai, Egypt. *Annal. Geol. Surv. Egypt*, Vol. 19, pp. 301-325.
- Gvirtsman, G., Weissbrod, T., Baer, G. and Brenner, G.J., 1996. The age of the Aptian Stage and its magnetic events: new Ar-Ar ages and palaeomagnetic data from the Negev, Israel. *Cretaceous Res.*, Vol. 17, pp. 293-310.
- Weissbrod, T., 1969. The Paleozoic of Israel and adjacent countries: Part II - The Paleozoic outcrops in southwestern Sinai and their correlation with those of southern Israel. *Isr. Geol. Surv. Bull.*, No. 48, 32 p.
- Weissbrod, T. and Sneh, A., 1997. Stratigraphy and sedimentology of the Lower Cretaceous Amir Formation in Israel and Sinai: A marine clastic deposit with tidal channels. *Isr. J. Earth Sci.*, Vol. 46, pp. 79-93.
- Weissbrod, T. and Barthel, W.K., 1998. An Early Aptian ichnofossil assemblage-zone in southern Israel and Sinai (Egypt): An ichnofauna habitat in a channelled tidal flat. *J. Afr. Earth Sci.*, Vol. 26, pp. 225-239.
- Weissbrod, T., Gvirtsman, G., Weinberger, G. and Sandler, A., 1990. Interfingering of marine and non-marine Cretaceous in southern Israel. *Cretaceous Field Conf.*, Jerusalem, Guidebook, pp. 65-97.

מצרים ומשתרעות על פני שטחים נרחבים באגן דחלה וברמת גילף כביר (ציור 2).

המגע בין תצורות אמיר ועברונה יוצר מדרגה בנוף והוא מוכר היטב גם במחשופי סיני. הוא בדרך כלל שטוח וחלק או מעט גלי ורק במקומות במקומות בודדים מראה תבליט של תעלות רדודות מאד החתורות בתשתית חולית. במדרגה זו נגלה אופק מאובני העקבות שהובחן הן במזרח סיני (ראס אל קלב, ג'בל גונה, ג'בל שיתי, ג'בל אל מורוואח) והן במרכז (ג'בל רקבה וואדי וורסה). במערב סיני תצורת אמיר חסרה מפאת גידוע. במדבר הדרום-מערבי אופק מאובני העקבות עבה יותר. באגן דחלה הוא כולל את גג תצורת שש גבעות (Six Hills), תצורת אבו בלס (Abu Ballas) כולה ואת בסיס תצורת סביה (Sabaya) (ציור 3).

בתצורת שש הגבעות מצויים עצים ושרכים מאובנים שטווח גילם יורה תיכון עד קרטיקון תחתון ופלינומורפים מגיל ברמיאן-אפטיאן תחתון. בתצורת אבו בלס, הידועה רק באגן דחלה, נמצא מאסף מאובנים מגוון המועיד על גיל אפטיאן תחתון וביניהם הצדפה *Protocardia judaica*.

הקרטיקון התחתון במחשופים שבמכתשי הנגב המרכזי והצפוני כלול כולו בתצורת חתירה. הוב החתך הינו קלסטי ממוצא פלוביאטילי, אך מצויים בו אינטרקלציות ימיות של קרבונטים, חוואר וחרסיות עם מאובנים שמספרן גדל מדרום לצפון. באמצעות תכונות סדימנטולוגיות מינרלוגיות ופיסיקליות המאפיינות את התצורות הקלסטיות באזור אילת ניתן להשוות ביניהן לבין היחידות הקלסטיות במכתש רמון, ולהבדיל בהם את מקבילותיהן של תצורת אמיר, עברונה וסמר (ציור 3). אופק קורלטיבי בין שני האזורים הוא בזלת רמון והסלעים הוולקניקלסטיים בתמנע המשתייכים לאותו אירוע (גיל רדיוגני זהה) ומצויים בגג תצורת עברונה.

באינטרקלציה הימית התחתונה ("לשון זוירה") במכתש רמון ובמכתש הגדול, בדומה לתצורת אבו בלס במצרים, נמצא המאובן הדיאגנוסטי *Protocardia judaica*.

גיל תצורת אמיר

גיל אפטיאן תחתון מוצע לתצורה על בסיס שיקולים סטרטיגרפיים מקומיים (העדר פער זמן בינה לבין תצורת

עברונה שבה אירוע וולקני מתוארך), קורלציה של כלל החתך הקלסטי לדרום-מערב מצרים ומכתשי הנגב באמצעות תכונות הסלע ונוכחות סמן ביוגני בולט בגג התצורה. חלקה התחתון של התצורה יכול להיות ברמיאן.

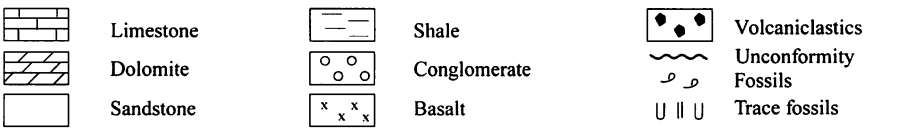
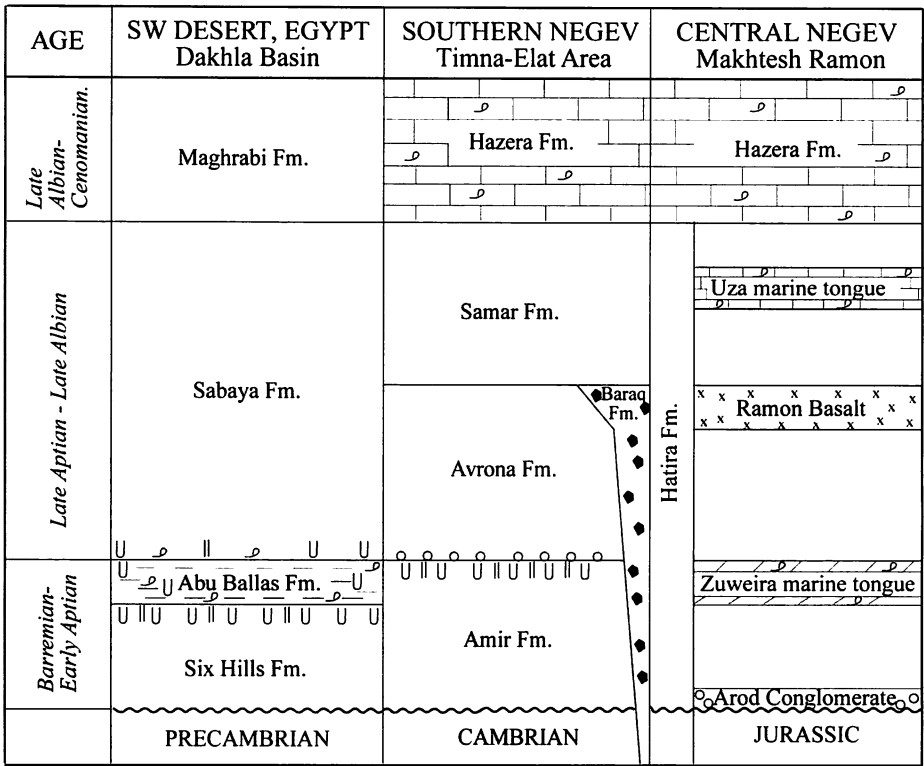
לעיון נוסף:

Böttcher, R., 1985. Environmental model of the shallow marine Abu Ballas Formation (Aptian, Nubia Group) in South-Western Egypt. N. Jahrb. Paläont. Abh., Vol. 169, pp. 261-283.

תפוצה וקורנציה של תצורות הקרטיקון התחתון

התחתון בשולי המסיב הקריסטליני מופיעים בפצאים קלסטי ומציגים אחידות לטרלית מרשימה. קיימים אמנם שינויים מקומיים, אך אין בהם כדי להפר את המתכונת הכוללת. תכונות סדימנטולוגיות, מינרלוגיות ופיסיקליות שמאפיינים את התצורות השונות בנגב הדרומי שרירות על פני מרחקים גדולים במקביל לסטרייק של ההשקעה, כך שאותן יחידות ליתוסטרטיגרפיות נקבעו בנפרד במחשופים המרוחקים זה מזה יותר מ-1000 ק"מ.

התצורות שהובחנו באזור אילת חשופות גם בסיני בחגורה כמעט המשכית המקיפה את המסיב הקריסטליני מתמנע למערב סיני, ומקבילותיהן נמשכות מעבר למפרץ סואץ אל דרום מערב

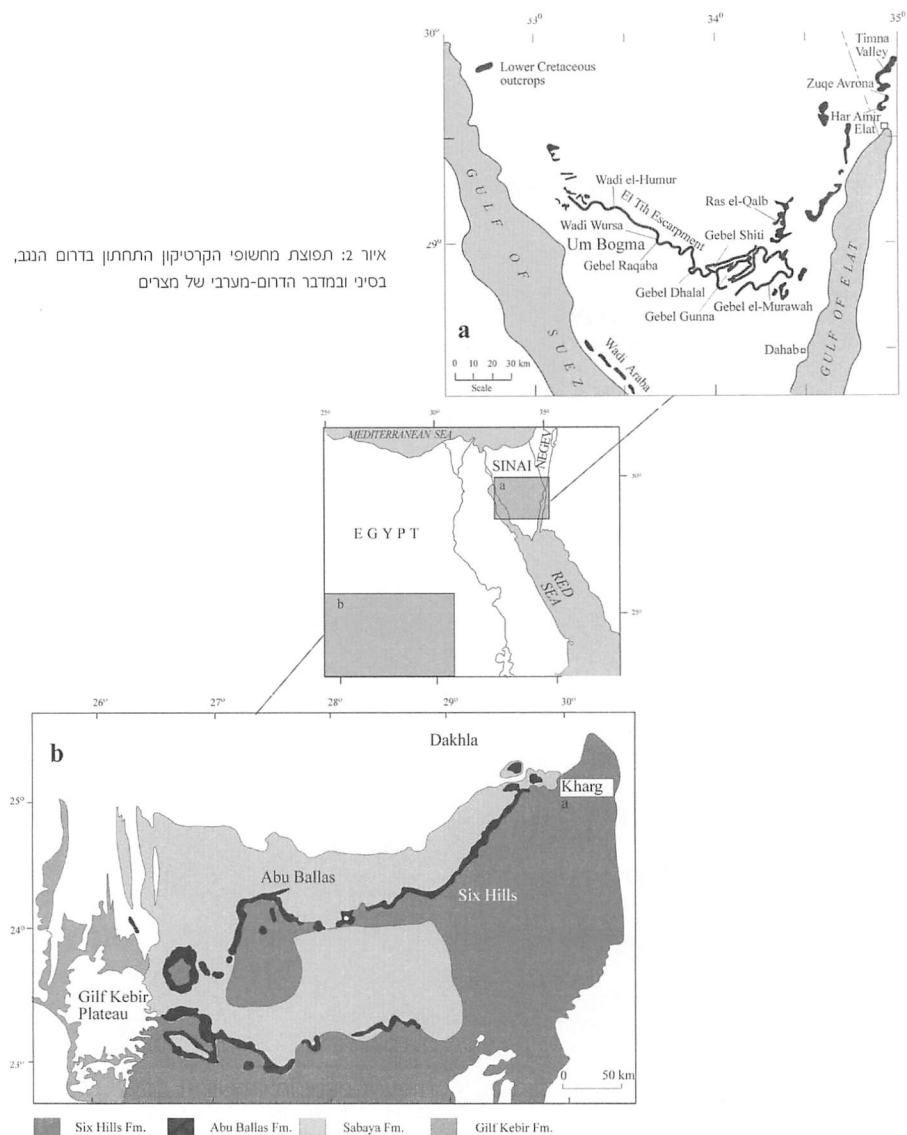


איור 3: קורנציה של תצורות הקרטיקון התחתון בנגב ובמדבר הדרום-מערבי במצרים

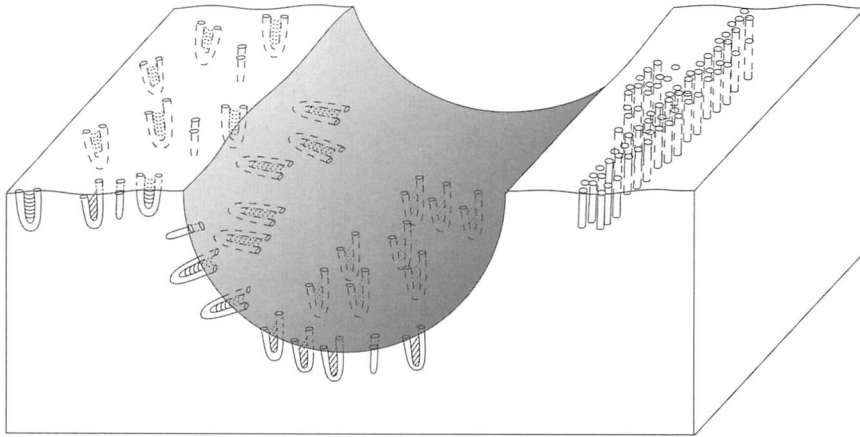
הנדירות של סטרקטורות ביוגניות ברוב החתך והשונות המוגבלת של המינים משקפים סביבה לוחצת בגלל שיעור השקעה גבוה למדי ונדידה מהירה של התשתית החולית.

רק בזמנים של קצב השקעה נמוך, שהיה אולי בחלק התיכון של התצורה ובמיוחד בחלק העליון, שררו תנאים לחיים פוריים יותר.

איור 2: תפוצת מחשופי הקרטיקון התחתון בדרום הנגב, בסיני ובמדבר הדרום-מערבי של מצרים



(trace fossils) בדרגות שונות של שימור, בהם נבירות מאונכות (tubes) או בצורת U הפוזרות בסלע או מרוכזות במושבות צפופות בצורת שכבות דקות או עבות יותר (piperock) או תלים (mounds). מאובני העקבות שבתצורה אינם מאבחנים את גילה אבל מהווים סמנים לטבעה של סביבת ההשקעה. חלק ממאובני העקבות, כמו Skolithos, Diplocraterion ו-Polykladichnus, מייצגים מבני מגורים קבועים של יצורים דמויי תולעים הניזונים מחומרים המרחפים בסוספנסיה או מאכלים חומר אורגני המצוי בסדימנט. מינים אחרים של מאובני עקבות בצורת נבירות רחבות ועמוקות יותר (Conichnus), מהווים מבני מגורים או מקלט של מיני סרטנים.



איור 1: חתלת זרימה ומאובני עקבות (מושבות Skolithos וריכוזי Diplocraterion). שנתגלת הזרימה מאורגנים בכיוון מסוים ולא לה ששל בני המשטח כיוון אקראי

כל המאובנים הקטנים ממולאים על ידי חול דק בדומה לסלע הסיביה בעוד שהמאובנים הגדולים ממולאים בחול גס, גרנולים וחלוקים שמקורם בתצורת עברונה שמעל.

המאובנים מייצגים קבוצה קטנה של מינים למרות שמספר הפרטים יכול להיות רב. כל טיפוס מייצג כיוון מועדף ומקומות גידול שונים לאורך ובין התעלות הטידליות קרוב לודאי איסטרטגיה של הסתגלות עם התייחסות לתשתית, להצפה ולעירבול (צירוף). ה- Diplocraterion תמיד מסודרים בניצב לפני השטח, אם ברצפה או בקירות ומשנים כיוון בהתאם לכיוון הזרם או עם שינוי בכיוון התעלה. Diplocraterion ו-Conichnus כנראה יותר סבילים ומופיעים גם בתעלות וגם על המשטחים החוליים בעוד Skolithos ו-Polykladichnus מופיעים רק על פני המשטח החולי. המאובנים מעדיפים תשתית רטובה ואבן חול דקה והם אופייניים לפציאס שמתפתח באבני חול נקיות, ממוינות, בסביבה של אנרגיה בינונית או גבוהה של פעולת גלים או זרמים הנתונים לאירוזיה פתאומית או שינוי חד בשיעור ההשקעה. תנאים כאלה הם טיפוסיים לסביבה סובטידלית רדודה או אינטרטידלית. העדר סטרקטורות כמו סדקי בוץ, שמציינים תקופות של חשיפה, מעידה שאבני חול אלה הושקעו בסביבה סובטידלית רדודה. גם נוכחות של מאובנים שיכולים לחיות רק זמן קצר מעל קו המים התחתון מעידים על סביבה סובטידלית.

עד 3 מ' הנמשכות עד למרחק של עשרות מ' (תמונה 1). ברבות מהתעלות הגדולות נבירות ופזורים בהן בלוקים של אבן חול ש"נמרו" מג תצורת אמיר שבסביבה או שאריות של אבן חול גסה, גריט וחלוקים של תצורת עברונה. בתעלות ולפעמים גם על המשטח החולי (sand bars) גומות ושקעוריות (potholes) עד לקוטר של 40 ס"מ, לעתים בסדרה מדורגת. פני השטח אשר גולפו על ידי זרמי הגאות והשפל היו חשופים לפרק זמן קצר יחסית עם נסיגת הים והסדימנט התקשה במידה מסוימת. המשטח כוסה על ידי שטף נהרות ונקבר בהרף עין תחת סדימנט



תמונה 1: תעלת זרימה טיפולית בנג תצורת אמיר. בחלק הקדמי של התצלום שקעוריות (potholes). אורכן של יחידות הסימון על גבי המוט שבקדמת התצלום הוא 10 ס"מ כ"א

גס המכיל גם בלוקים וחתיכות שנמרו משטחי החול והבוץ של גג תצורת אמיר וחלוקים ואבן חול גסה שמרכיבים את שכבות הבסיס של תצורת עברונה. כיום, עם נסיגת המצוק של תצורת עברונה, נחשפים פני שטח אלה מחדש. אירוזיה הולקנית קילפה והסירה את המילוי הפרך יותר של תצורת עברונה הממלא את התעלות וחשפה משטח מאובן מושלם עם מורפולוגיה של תעלות גאות ושפל. משטח זה היה חשוף זמן ממושך למדי כדי להפוך מוקשה בדרגה מסוימת ולעבור אירוזיה קלה למדי, אך לא ארוכה מדי כדי להרוס את מערכת התעלות, גם את העדינות שביניהן ולא את

הנבירות או החלק העליון של מבני המאובנים שחיו לאורכן. נתוני השטח מעידים על כן שהגבול בין תצורת אמיר לתצורת עברונה אינו מבטא פער זמן. לכך חשיבות בהערכת הגיל של תצורת אמיר.

המאובנים

אין בתצורת אמיר שרידי מאובנים או צמחים ורוב החתך עקר ובלתי מופר על ידי פעילות אורגנית (bioturbation), אבל בכמה מפלסים בתצורה, במיוחד ברובד שעוביו מספר מטרים בחלק העליון של התצורה, מצויים מאובני עקבות

אכן חול לבנה עם קרום בליה בזל-
חום, מוצקה עד פריכה, דקת גרגר עד

בינונית, מיון בינוני עד טוב, עם קאוליניטי אותיגני מגובש היטב בכמות רבה. גרגרי קוורץ גסים או גרנולים ומעט חלוקים קטנים פזורים באבן החול, ביחוד בחלק התחתון של התצורה. לסירוגין מופיעים אופקים עדשתיים של סילט נציצי בעובי 30 עד 70 ס"מ, שניתן לעקוב אחריהם לאורך עשרות מטרים. השיכוב צולב ומאורגן ביחידות של סטים פלנריים-טבולריים וקעריים רדודים שעוביים בין 0.3 ל-2.5 מ' שלהוב נוטים למערב או צפון-מערב. חלק מהסטים מעוותים (convolute; recumbent), לעתים בסדרות רוכבות. היחידות בנויות מרצפים של התדקקות כלפי מעלה (fining upward). עובי הסטים וגודל הגרגר הופכים דקים יותר והמיון טוב יותר כלפי חום הרצף. במורדות הדרומיים של הר אמיר הובחנו 8 רצפים של התדקקות כלפי מעלה, בעובי בין 2 ל 12 מ', שכל אחד מהם מסתיים באבן חול דקה עם שיכוב צולב דק לחילופין עם אופקים ועדשות של סילט למינרי. לעתים קרובות הסילט חסר אם בשל גידוע או בשל ערבובו עם חול. החלק העליון של התצורה (כ-10-15 מ') מורכב מאבן חול דקת גרגר הסדורה בסטים דקים או מסילטים וחרסיות באופקים דקים שמופיעים גם כעדשות או חלקיקי בוץ במסה חולית.

פענוח סביבות השקעה עתיקות מתבסס לרוב על פרמטרים גרנולריים, סטרוקטורות סדימנטריות, הגיאומטריה של הרצפים ומאסף המאובנים. נתונים כאלה שימשו גם בפענוח סביבות ההשקעה של תצורת אמיר, אך תנאים מיוחדים של קבורה ואירוזיה הביאו לחשיפה נדירה ומראה בעליל של משטח גאות ושפל אותנטי עם תעלות זרימה ומאובנים שונים בתחומי חיותם (להלן). כל אלה מעידים כי תצורת אמיר או ברובה שקעה בסביבה ימית עם אנרגיה גבוהה, באזור ליטורלי או סובטידלי רדוד. החלק העליון של התצורה שהוא דק גרגר יותר והסטרוקטורות הסדימנטריות בו דקות יותר, משקף כנראה מעבר מהסביבה הסובטידלית עם האנרגיה הגבוהה לתנאים של אנרגיה נמוכה יותר, אבל מבנים אופייניים לסביבה אינטרטידלית (lenticular; wavy; flaser) כמעט ואינם קיימים. עם זאת הנפיצות של עדשות ומבנים אירגולריים של ברקציה סילטית או חרסיתית מציינים את הקירבה של האזור האינטרטידלי הבוצי, מקום ממנו נמרו קלסטים האלה.

עם זאת יש לציין כי השליש התחתון של תצורת אמיר, שהוא גם יותר וחסר כל סימן של פעילות אורגנית, מאופיין בדגם סדימנטולוגי הנפוץ גם בסביבה פלוביאטילית, ואכן מבטא סביבת השקעה כזו.

משטח גאות ושפל

בחלק ממחשופי התצורה בישראל ובסיני, ובמיוחד בהר אמיר ותמנע, מצויות בנג התצורה תעלות זרימה החתורות במשטח חולי שרוחבן נע בין ס"מ בודדים עד 5 מ' ועומקן בין 1 ס"מ



הפתח התחתון

הקרטיקון התחתון בנגב הדרומי כולו קלסטי. בבולו התחתון תצורות חליות מגיל קמבריום (שחורת או נטפים) ומעליו תצורה קרבונטית מגיל אלביאן עליון - קנומן תחתון (חביון - בעבר פרט תחתון של תצורת חצרה). עוביו כ- 250 מ' וגילו ברמיאן-אלביאן. מובחנות בו שלוש תצורות:

תצורת אמיר: אבן חול לבנה עם קרום בליה בז'-חום, דקת גרגר עד בינונית, עם אופקים דקים של סילט. השיכוב צולב, לרוב פלנרי-טבולרי ולעתים מבני דפורמציה. הצמנט הוא קאוליניט אותיגני מגובש היטב. בחלק התיכון והעליון מאובני עקבות (להלן). התצורה הושקעה בסביבה חופית רדודה באזורי גאות ושפל. הגיל ברמיאן עד אפטיאן תחתון. העובי בין 20 ל- 70 מ'.

תצורת עברונה: אבן חול אפורה לבנה, גסת גרגר עד בינונית עם רצועות ועדשות של גריט וחלוקים. השיכוב גס וצולב. בחלק התחתון של התצורה מצויים תרכיזים ונודולות של נחשת וברזל וכן חלקי שרכים מאובנים (*Alstaettia*; *Paradoxopteris*) ועצים מחטניים (*Dadoxylon*; *Heterdadoxylon*). בתמנע מצויות בגג התצורה תופעות וולקניקלסטיות (דיאטרמים). התצורה הושקעה בסביבה פלוביאטילית. הגיל אפטיאן עליון עד אלביאן תחתון. העובי כ- 60 מ'.

תצורת סמר: אבן חול לבנה אפורה עם גוני סגול אדום וצהבהב, בינונית עד דקת גרגר, ולסירוגין אופקים ועדשות של סילט (בחלקם פליאוסולים) לרוב אדומים וסגולים, ולעתים מנומרים. כמו כן קרומי ברזל. השיכוב צולב בדומה לזה שבתצורת עברונה, אך בקנה מידה קטן יותר. בחתך פזורים חלוקים וגרנולים ופרגמנטים של שרכים (*Weichselia reticulata*-*Paradoxopteris*). התצורה הושקעה בסביבה פלוביאטילית ולקוסטרית. בחלק העליון השפעה ימית. הגיל אלביאן תיכון - עליון. העובי בין 50 ל-150 מ'.

הבדלים בין התצורות

גודל גרגר (גס לעומת בינוני-דק), צבע (לבן לעומת אפור או צבעוני-סגול-אדום). צבע עצמי (לבן, אפור) לעומת קרום בליה (בז'-חום), מורפולוגיה של בליה (מצוקים מדורגים לעומת מעוגלים), צמנט של קאוליניט (ודיקיט) מגובש היטב לעומת קאוליניט פחות מגובש, שינויים בתפוצת מינרלים כבדים, נוכחות או העדר חלקי קוורץ, מבני דפורמציה, נודולות ותרכיזים של נחשת וברזל, פליאוסולים וקרומים ברזליים, מאובני עקבות ומאובני צמחים.

כתוצאה מתנועת גזירה מדודה, הגורמים לירידה ברמת המימן, מקטינים את פרווזיות התוך ויוצרים אנאיזוטרופיה במוליכותו ההידראולית. ההערכות התת מקבילה של פסי הדפורמציה בגוף כל העתק והכיווניות המועדפת של ההעתקים מציעות אנאיזוטרופיה במוליכות ההידראולית של כלל אזור העבודה. יחס הזמנים בין פעילות ההעתקה הנחקרת להיווצרות סינקלינית אמיר טרם הוברר ויחקר בעזרת "מבחן קמטי" בעתיד.

ספרות נוספת

גרפונקל, צ., 1970. הטקטוניקה של השוליים המערביים של הערבה הדרומית. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים

Antonellini, M. A., Aydin, a. & Pollard, D. D., 1994. Microstructures of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. *J. Struct. Geol.*, Vol. 16, No. 7, pp. 941-959.

Aydin, A., 1978. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure and Appl. Geophys.*, Vol. 116, pp. 913-930.

Cashman, S. & Cashman, K., 2000. Cataclasis and deformation-band formation in unconsolidated marine terrace sand, Humboldt County, California. *Geology*, Vol. 28, No. 2, pp. 111-114.

Davis, G. H., Bump, A. P., Garcia, P. E., Ahlgren, S. G., 2000. Conjugate riedel deformation band shear zones. *J. Struct. Geol.*, Vol. 22, pp. 169-190.

Garfunkel, Z., Eyal, Y., Eyal, M., Weissbrod T., Bakler, N., Shimron, A. E., Peltz, S., Gutkin, V., Bartov, Y., Druckman, Y., Rosensaft, M. & Sneh, A., 2000. Geological Map of the Northern Gulf of Elat Area. The Geological Survey of Israel.

Mair, k., Main, I. & Elphic S., 2000. Sequential growth of deformation bands in the laboratory. *J. Struct. Geol.*, Vol. 22, pp. 25-42.

תחנה 6 (איור 10)

דגם הדפורמציה בתחנה זו פשוט יחסית לדגם הדפורמציה שנחשף בתחנה 5. הסיבה העיקרית לכך היא שמרבית פסי הדפורמציה שייכים למערכת אחת בכיוון 310° ורק מיעוטם שייכים למערכת 340° . בתחנה זו מדון בתכונות ההידראוליות של פסי הדפורמציה ואזורי הדפורמציה. בציור 10 מופיעה הגדלה של שקף בו נראים פסי דפורמציה וביניהם רצועה של הסלע המארח (לקוח מתצורת אמיר בקרבת מקום). השקף נצבע באפוקסי כחול שחדר לנקבובים והדגיש את האזורים בעלי המוליכות ההידראולית הגבוהה. אזורים אלו כוללים את הסלע המארח שבין פסי הדפורמציה המקבילים, ואינם כוללים את פסי הדפורמציה, לאורכם החדירות נמוכה מאוד. הדבר דומה לתעלות המאפשרות מעבר נוזלים לאורכן ומונעות מעבר נוזלים בניצב להן. באופן דומה ובקנה מידה גדול יותר ניתן להניח שעיקרון זה נכון גם לסלע המארח הנתון בין שני אזורי דפורמציה צרים ואף בין אזורי דפורמציה מפותחים יותר (בפועל - בין הואדיות המנקזים את הר אמיר צפונה). לפיכך אנו מצביעים על האמאיזוטרופיות במוליכות ההידראולית בכלל אזור העבודה.

תחנה 7

בתחנה זו נחשף העתק בכיוון 325° . יחידות סלע מוסטות (דרומית לתחנה, במעלה ההר) מראות על העתקה בעלת רכיב נורמלי של כ-3 מ'. בניגוד להעתקים שבצפו בתחנות קודמות חלוקת המעוות אינה שווה על פני הפסים היוצרים את אזור הדפורמציה, וחלק משמעותי של התנועה התרחש על מישור החלקה (slip surface) בודד. ניתן להבחין במבנה הגלי ובפסי ההחלקה האופייניים למישור זה. חלוקי קוורץ מתצורת עברונה (גודל אופייני עד ס"מ ספורים) הקיימים באזור הדפורמציה מדגישים את ריכוז המעוות על מישור ההחלקה. החלוקים הרחוקים מהמישור כדי סנטימטרים ספורים לא נפגעו מהדפורמציה, אלה הסמוכים נסדקו בכיוון תת מקביל למישור ההעתק, ואלה שנקלעו לתוכו הועתקו.

בטור הסלעים בהר אמיר וסביבתו קיימת עדות לדפורמציה משמעותית של קימוט והעתקה. עשרות העתקים ערוכים בכיוון כללי צפון-צפון

סיכום

מערב עד צפון מערב, ורבים מהם בעלי מישורים תלולים ורכיב העתקה נורמלי משמעותי. באבני החול מתרכזת ההסטה באזורי דפורמציה הבנויים ממספר רב של פסי דפורמציה סמוכים. יחסי השדה מציעים שפסי הדפורמציה הערוכים בשני הכיוונים האופייניים, 310° ו- 340° , פעלו בו זמנית. דגמים גאומטריים שיוצרים פסי הדפורמציה מופיעים בגדלים שונים ומראים דמיון עצמי. המבנה הפנימי של פסי הדפורמציה מראה ריסוק, רוטציה והקטנה משמעותית בגודל הגרגר

על סמך יחסי הסטה ודגמי מניפה בתחנה זו אנו מציעים שלבים אפשריים בהתפתחות הדפורמציה (ציור 9):

A. היווצרות פסי דפורמציה בכיוון כללי 340° .

B. היווצרות פסי דפורמציה בכיוון כללי 310° .

C. המשך תנועה במערכת 340° תוך התפתחות חלק מהפסים לאזורי דפורמציה צרים, והיווצרות של פסים ממערכת 310° .

D. תנועה במערכת 310° תוך התפתחות חלק מהפסים לאזורי דפורמציה והתווספות פסים חדשים.

ההתפתחות המשולבת של הדפורמציה בשני הכיוונים מציעה העתקה בזמנית על שתי המערכות.

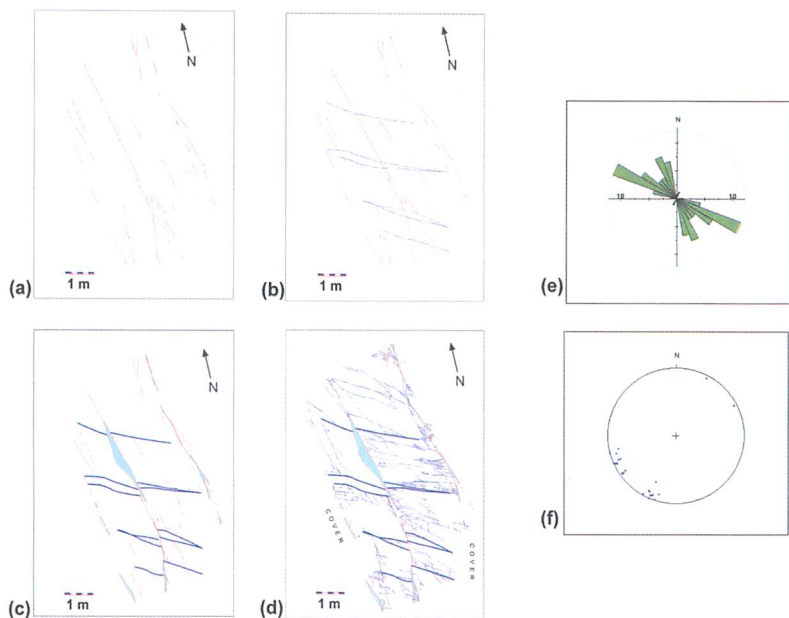


Fig 9: (a-d) Inferred stages of fault zone evolution at station 5. (e) Rose diagram showing the band strikes. (f) Lower hemisphere stereographic projection of poles to band planes.

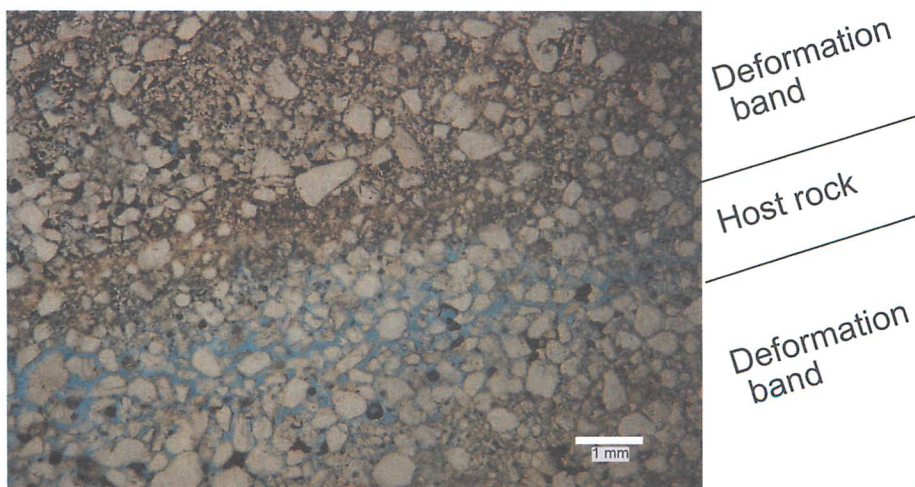


Fig 10: Thin section of deformation bands (Amir Formation).



Branching points

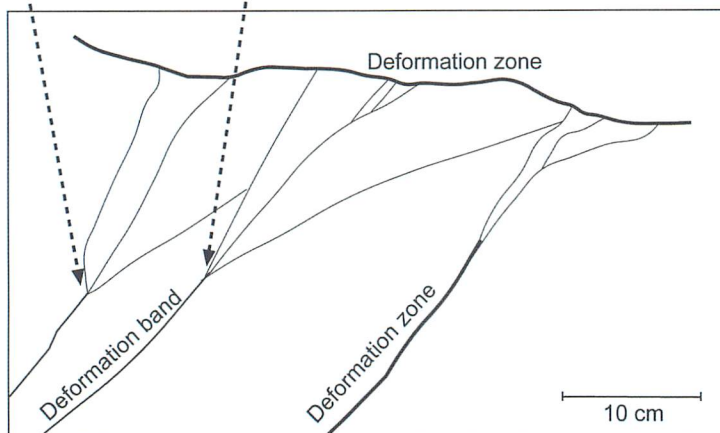


Fig 8: Fan-like structures in station 5 branching from rungs within a ladder structure.

4. קיימים דגמים אופייניים של פסי דפורמציה כגון דגם "סולם" (ציור 7) ודגם "מניפה" (ציור 8). היחס הקבוע בין מרווח השלבים למרווח קורות הסולם (קווי עזר a - b בהתאמה בציור 7a) נשמר בגדלי דגם שונים ומצביע על דמיון עצמי (self similarity) של הדגם (ציור 7b).

נצר קרוב לודאי בשלב מאוחר כתוצאה מהבדלי קושי בין אזור הדפורמציה לסלע הסביבה הפריך יותר והסרת עומס סדימנטים (unloading) מעל התצורות החוליות, ומהווה תואי נוח לזרימת מים. הערוץ החתור לאורך הסטרייק של אזור הדפורמציה בכיוון 310° נשפך לערוץ גדול ממנו שכיוונו 340° . גם ערוץ זה מתחתר באזור דפורמציה המעתיק יחידות סלע עשרות מטרים וחוצה את כל אגפו הצפוני של הר אמיר. שני אזורי דפורמציה אלה, על אופיים, גודלם וכיוונם מייצגים אזורי דפורמציה רבים נוספים בהר אמיר, ומרמזים על סדר בתהליכי הדפורמציה.

5 תחנה (איורים 7, 8, 9)

התחנה הנוכחית

ממוקמת במפגש שני ערוצים החתורים לאורך שני אזורי דפורמציה. מיפוי מפורט בקני"מ 1:20 של אזור מפגש הערוצים מצביע על הנקודות הבאות:

1. פסי הדפורמציה ערוכים בשתי מערכות עיקריות - בכיוונים 310° ו- 340° .

2. כיווני פסי הדפורמציה, תלילותם, מגמת ההעתקה הנורמלית ושיעור חוזרים על עצמם רב הפסים שנבדקו.

3. קיימות הסטות הדדיות של פסי דפורמציה ממערכת 310° ומערכת 340° . הדבר מצביע קרוב לודאי על היווצרות בו זמנית של שני אזורי דפורמציה.

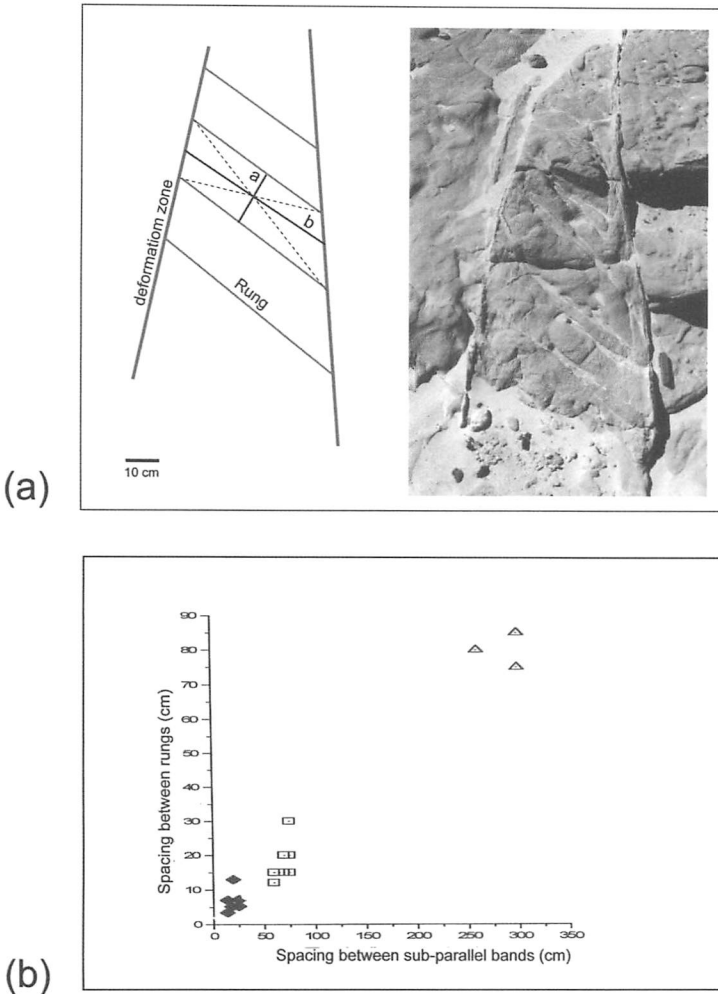


Fig 7: Ladder structures in station 5. (a) Field appearance and geometrical definitions. (b) Spacing within ladder structures (different symbols correspond to measurements of different ladders).

בתחנה זו מצטרפים מאות פסים ליצירת אזור דפורמציה (deformation zone) בכיוון 310° . כל ההעתקים שנצפו ומופו בתצורות החוליות בנויים מאזור דפורמציה. התפתחות אזור דפורמציה מוסברת בהעתקה המדודה והמוגבלת על כל פס בודד. בעקבות מאמצים הפועלים על הסלע מתרחשות כניעה והתחלת תנועה לאורך מישור גזירה. הריסוק המשמעותי והקטנת גודל הגרגר מצריכים מאמצים גדלים והולכים להמשך התנועה (strain hardening). התנועה ננעלת לאחר הסטה מדודה על ההעתק (עד סנטימטר בדרך כלל) ומתחדשת לאורך פס דפורמציה חדש סמוך, הערוך בכיוון מרחבי דומה (צויר 6). תהליך זה חוזר על עצמו כל עוד מעוות הסלע נמשך, ועשוי לפתח מאות פסי דפורמציה סמוכים. לעיתים, סך ההעתקה באזור דפורמציה שווה להעתקה המצטברת על כל אחד מהפסים המרכיבים אותו. להערכת כמות ההעתקה נעזר במגע התצורות אמיר ועברונה הנראה בבירור ממערב לאזור הדפורמציה אך חסר באגף המזרחי, הנבנה על ידי תצורת אמיר בלבד. ניתן להסיק מכך על העתקה עם רכיב נורמלי של 3 מ' לפחות. נשים לב גם לנטייה התלולה של מישור ההעתקה ($< 80^\circ$) ולניצולו כתוואי התחתרות. השוליים של אזורי הדפורמציה מלווים במקרים רבים בסידוק (jointing) תת מקביל. סידוק זה

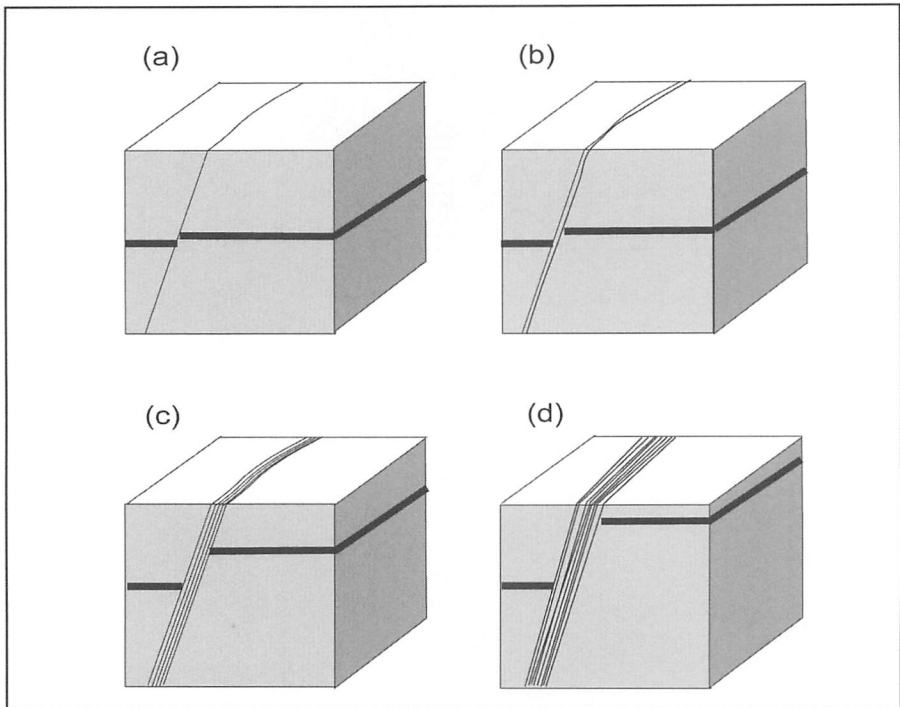


Fig 6: Progressive development of a deformation zone (after Aydin, 1978)

תחנה 3 (איור 5)

כאן ובתחנות סמוכות נחשפים מאות העתקים קטנים בעלי הסטה של סנטימטרים ספורים, הבולטים כפסים דקים ובהירים ביחס לסביבתם. בשקפים ניתן לראות שהפסים מורכבים מרסק של גרגרי קוורץ שעברו סידוק והטציה ומלווים בירידה משמעותית בפורוזיות התווך. תצפיות

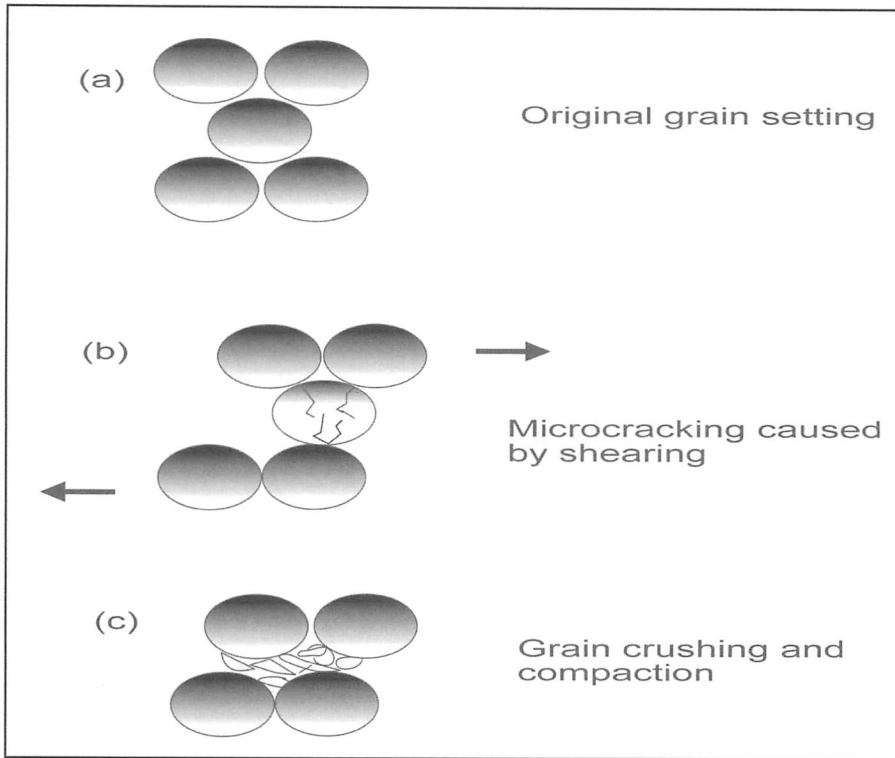


Fig 5: Schematic model of deformation mechanism within a band (after Antonellini et al., 1994)

אלה הנתמכות בנסיונות מעבדה מלמדות על העתקה כתוצאה מכוחות גזירה (ציור 5). העתקים קטנים כאלו אופייניים לאבני חול פורוזיות ומכונים "פסי דפורמציה" (deformation bands). לעיתים מתרחשת העתקה משמעותית יותר ומתקבל מישור העתק ועליו סימני החלקה. דוגמאות לכך נציג בתחנה הנוכחית ובתחנה 7 להלן. בדרכנו לתחנה 4 הממוקמת כ- 15 מ' דרומית לתחנה 3 נבחין בעשרות פסי דפורמציה המתקבצים בכיוון תת מקביל ליצירת העתק גדול יותר בכיוון 310° .

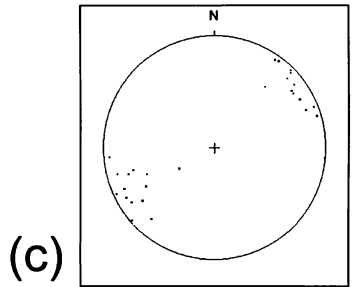
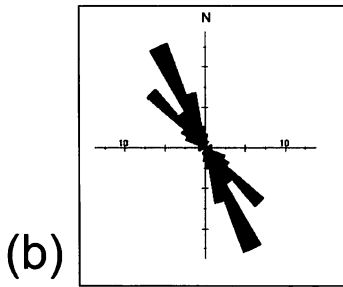
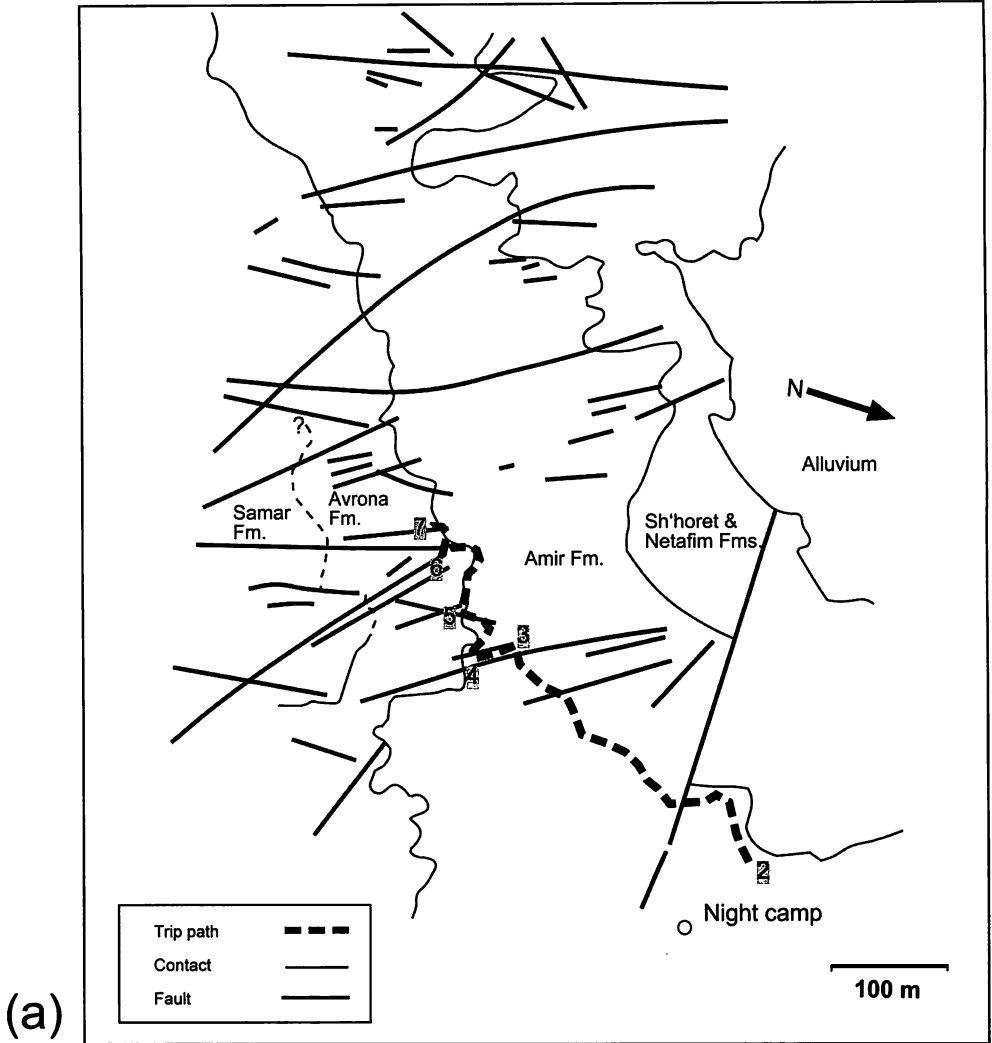


Fig 4: (a) Map view of fault traces in the NW flank of Mt. Amir. (b) Rose diagram showing the fault strikes. (c) Lower hemisphere stereographic projection of poles to fault planes.

תחנה 2 (איורים 3,4)

החתך הגאולוגי באזור הסיוור כולל שתי יחידות סלע עיקריות. האחת, סלעי התשתית הקריסטלינית הפרה-קמברית, והשניה סלעי הכיסוי הסדימנטרי מגיל קמבריום ואילך. הטור הסטרוגראפי כולל את התצורות שחורת ונטפים (חומות אדמדמות) הקמבריות, תצורת אמיר (לבנה), עברונה (אפרפרה), סמר (צבעונית) וחצרה מגיל קרטיקון (ציור 3).

במבט צפונה נראים סלעי התשתית מועתקים כנגד הסלעים הסדימנטריים. העתקים נוספים בכיוון כללי מזרח-מערב שוברים את החתך הסדימנטרי. העתק כזה, המעמיד את תצורת החול הקמברית מול התצורות הקרטיקוניות נראה למרגלותיה הדרומיים של הגבעה החומה הסמוכה לנו ממערב, ונמשך מזרחה לאורך דרך העפר בה הגענו. במבט דרומה אל עבר המצוק העליון של הר אמיר נצפים העתקים בבסיס חבורת יהודה. העתקים אילו ערוכים בכיוון כללי צפון-צפון מערב עד צפון מערב, ולאורך רבים מהם התחתרו ערוצים המנקזים את המפנה הצפון-מערבי של הר אמיר. מקבוצה זו מיפנו בהר אמיר עשרות העתקים, לאורכם נמדדה העתקה של מטרים ספורים עד עשרות מטרים. רבים מהם ערוכים בשני כיוונים עיקריים סביב 310° ו- 340° וחלקם חוצה את כל הטור הסדימנטרי (ציור 4). מישורי ההעתקים תלולים ברובם (דיפ $< 70^{\circ}$) ומראים סימני החלקה בעלי רכיב נורמלי משמעותי. בנוסף להעתקתן, נטויות השכבות הבונות את אנפו הצפון-מערבי של הר אמיר לכיוון דרום-מזרח ומשלמות תמונת דפורמציה מורכבת של קימוט ושבירה.

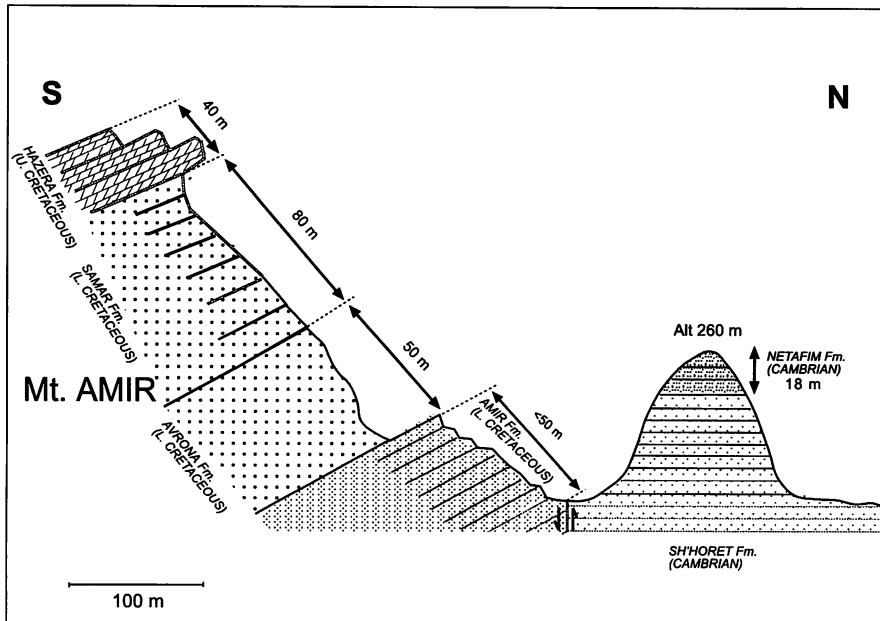


Fig3: Schematic cross section of the NW flank of Mt. Amir.

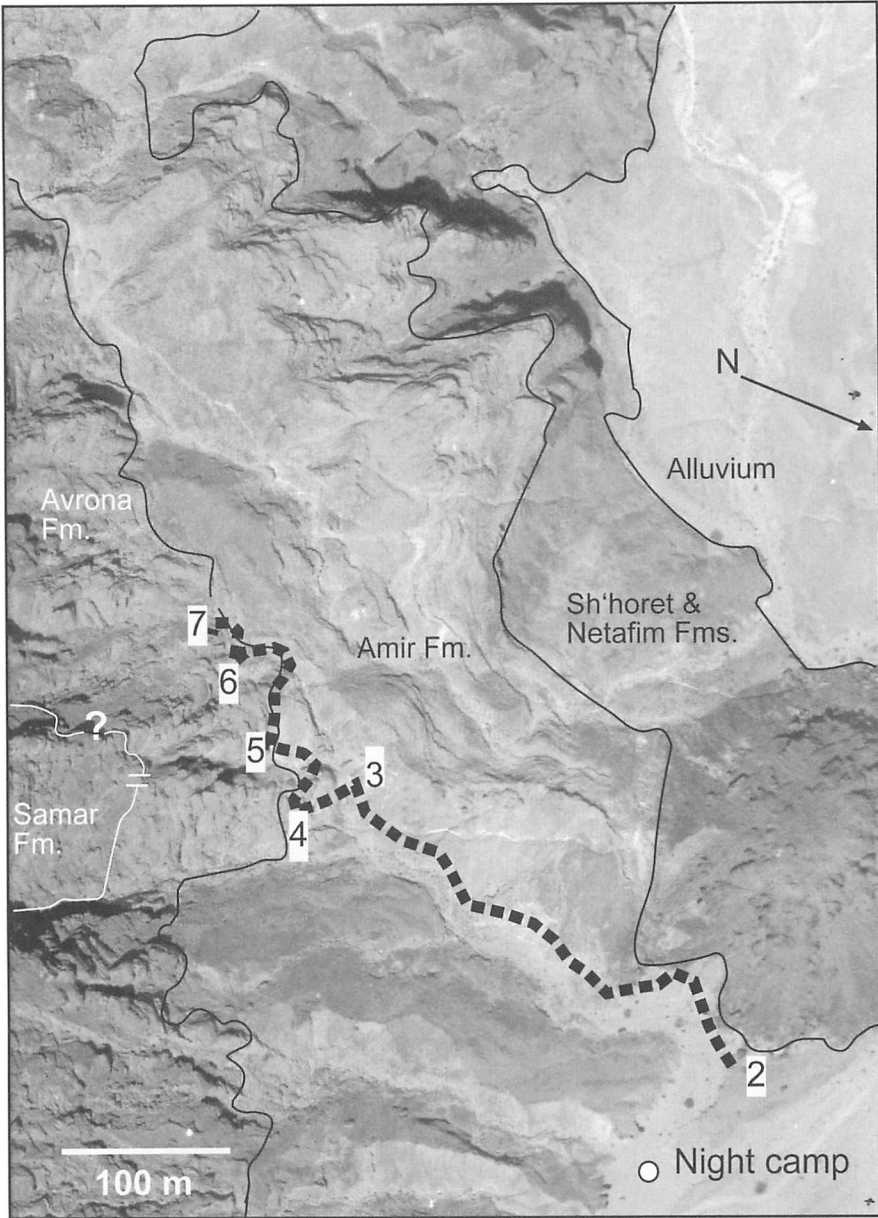


Fig 2: Aerial photo of the NW flank of Mt. Amir. Contacts between formations and station locations are indicated.

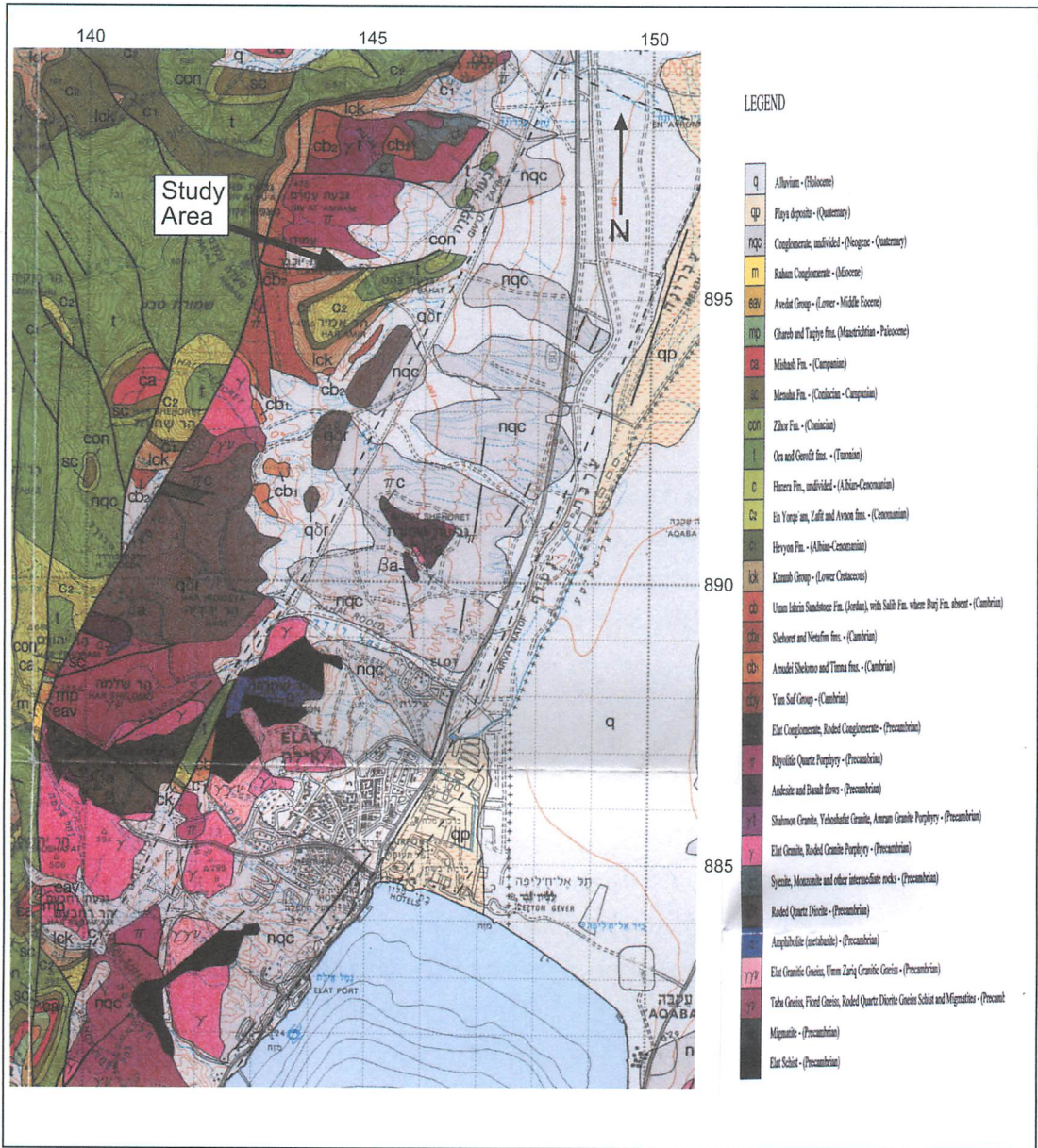


Fig 1: Geological map (1:100,000) of the study area (from Garfunkel et al., 2000).



לסיור הנוכחי שתי מטרות עיקריות:

1. הגדרת מערכות ההעתקה הראשיות בהר אמיר ואפיון התנועה עליהן.
2. הצגת המבנה הפנימי של ההעתקים וזיהוי שלבים בהתפתחותם.

ציורי זרך

(איורים 1, 2)

יוצאים מאילת לאורך כביש הערבה (כביש 90) צפונה. פונים מערבה בקרבת אבן דרך 20 לדרך עפר כבושה המובילה לעמודי עמרם (סימון שבילים כחול). נוסעים לאורך 3.9 ק"מ אל תחנה 1 הממוקמת צפונית למפתח של סינקלינת אמיר. ממשיכים בדרך העפר לאורך 1.1 ק"מ אל תחנה 2 הממוקמת בסמוך לחניון הלילה למרגלות גבעה חומה. מחנים את הרכב וממשיכים רגלית לאורך כ- 0.7 ק"מ במורדות הצפון-מערביים של הר אמיר אל תחנות 7-3 (ראה מיקום תחנות בציר 2).

1 תחנה

סינקלינת אמיר הינה מבנה שוליים בחלקו הצפוני של גוש הודד (איור 1). היווצרותה קשורה לתנועות העתקה תת מקבילות לבקע שהסתיימו כנראה לפני אמצע הפליוקן (גרפונקל, 1970). בסינקלינה השתמר טור מסלעי הכיסוי הסדימנטרי שהודד סטרוקטורלית, עבר התארכות בכיוון כללי צפון מזרח-דרום מערב והתקצרות בניצב לכיוון זה. אנפי הסינקלינה נוטים בחריפות כלפי ציר הסינקלינה המקביל לכיוון ההתארכות המרבית. לאורך דרך העפר החוצה את המבנה (תחנה 1) נחשפות אבני חול מהקרטיקון התחתון וסלעים קרבונטיים מחבורת יהודה. קימוט הדוק סביב ציר הסינקלינה נראה היטב בתצורת גרופית צפונית מזרחית לתחנה 1. סמוך למפתח הצפון מערבי נחשפות תצורות חול קמבריות שאינן חשופות באגף הדרומי.

- Garfunkel, Z., Zak, I., Freund, R., 1981. Active faulting in the Dead Sea Rift. *Tectonophysics*, 80: 1-26.
- Gerson, R., Grossman, S., Amit, R., Grinbaum, N., 1993. Indicators of faulting events and periods of quiescence in desert alluvial fans. *Earth Surf. Processes Landforms* 18: 181-202.
- Ginat, H., Eyal, Y., Bartov, Y., Zilberman, E., 1994. Mapping young faults in alluvial fans in Eilat. *Isr Geol Surv. Tech. Rep.*, TR-GSI/14/94.
- Porat, N., Amit R., Zilberman, E., Enzel, Y., 1997. Luminescence dating of fault-related alluvial fan sediments in the southern Arava Valley, Israel. *Quater. Sci. Reviews (Quaternary Geochronology)*, 16: 397-402.
- Porat, N., Wintle, A. G., Amit, R., Enzel, Y., 1995. Late Quaternary earthquake chronology from Luminescence dating of colluvial and alluvial deposits of the Arava Valley, Israel. *Quarter. Res.* 46: 107-117.
- Shtivelman, V., Frieslander, U., Zilberman, E., Amit, R., 1995. High Resolution Seismic Reflection Survey at the Nahal Shehoret site, southern Arava Valley. *IPRG Rep. K49/146/94*, 3 pp.
- Shtivelman, V., Frieslander, U., Zilberman, E., Amit, R., 1997. High Resolution Seismic Reflection Survey in the Avrona area, southern Arava Valley. *GII Rep. 800/5/96*, 9 pp.
- Sylvester, G.A., 1988. Strike-slip faults. *Geol. Soc. Am. Bull.* 100: 1666-1703.
- Zak, I., Freund, R., 1966. Recent strike slip movements along the Dead Sea Rift. *Isr. J. Earth Sci.*, 15: 33-37.
- Zilberman, E., Amit R., Porat, N., and Enzel, Y. Evidence for surface rupture induced by the devastating AD 1068 earthquake in the southern Arava Valley, Dead Sea Rift, Israel. (*JGR*, in press).

סקר גיאופיסי זיהה בתת הקרקע באזור זה מספר שברים, המהווים חלק מרצועת המירה של שבר עברונה. שברים אלה יוצרים על פני השטח ליניאמנטים, מתלולי שבירה ומבני לחיצה או מתיחה הניכרים במורפולוגיה של הסדימנטים המורמים.

הגבול המזרחי של הרכס המורם מתאפיין במערכת מדרונות לינאריים שכוונם תת-מקביל למערכות השבירה. למרות שאין מידע מתת הקרקע לגבי מיקומם המדויק ל השברים באזור זה, מצביעה המורפולוגיה על אפשרות שהגבול המזרחי של הרכס המורם עוצב בתהליכי שבירה.

בתצפית מהרכס ניתן לראות את מערכת האפיקים הרחבה המכסה את החלק המזרחי הנמוך של אגן עברונה ואת האוכפים הסטרוקטורליים הקטנים דרכם חוצים מי השטפונות את הרכס הרדוד לדרום מערב.

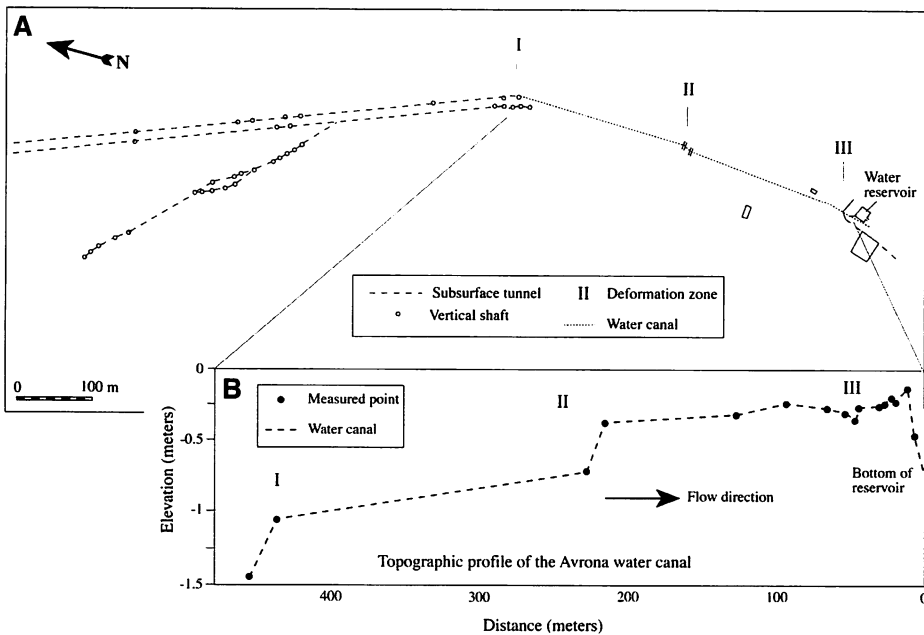
מקורות

- Amit, R., Harrison, J.B.J., Enzel, Y., 1995. Use of soils and colluvial deposits in analyzing tectonic events - the southern Arava Rift, Israel. *Geomorphology* 12: 91-107.
- Amit, R., Zilberman, E., Porat, N., Enzel, Y., 1999. Relief inversion in the Avrona Playa as evidence of large-magnitude historical Earthquakes, Southern Arava Valley, Dead Sea Rift. *Quaternary Res.* 52: 76-91
- Avner, U., 1993. The history of the southern Negev and Elat in the light of new studies. In: Cohen, M and Shiler, E. (eds). *Elat - Man, Sea and Desert*. Ariel Press. pp. 113-184 (in Hebrew)
- Ben Gai, Y., Rotstein, Y., Bartov, Y., 1993. High Resolution Seismic Reflection Survey in the Avrona area. IPRG Rep. 1/357/93, 7p.
- Enzel, Y., Amit, R., Harrison, J. B. J., Porat, N., 1994. Morphologic dating of fault scarps and terrace risers in the southern Arava, Israel: Comparison to other age-dating techniques and implications for paleoseismicity. *Isr. J. Earth Sci.*, 43: 91-103.
- Enzel, Y., Amit, R., Porat, N., Zilberman, E., Harrison, J.B.J., 1996. Estimating the ages of fault scarps in the Arava, Israel. *Tectonophysics*, 253: 305-317.
- Fruend, R., Zak, I., 1968. Age and rate of sinistral movement along the Dead Sea rift. *Nature*, 220: 253-255.
- Garfunkel, Z., 1970. The tectonics of the western margins of the southern Arava Valley. Ph.D. Thesis, Hebrew Univ., Jerusalem, 204 pp. (in Hebrew with English abst).

ברכת האגירה במטר מהמוצא של מערכת התעלות התת-קרקעיות אל התעלה שהינה אותה. לאורך המערכת העילית נמצאו שלושה אזורי דפורמציה, שניתן להסבירם כתוצאה של הסטה על ידי שברים המתפצלים מאזור המירה של שבר עברונה.

נראה אם כן, שרעידת האדמה של 1068 ששינתה את נוף המלחה גרמה בין היתר מקים קשים למערכת ההשקיה של החווה המוסלמית בשולי מלחת עברונה. מאחר שאילה, שהיתה השוק העיקרי לתוצרת החווה חרבה וננטשה, לא היה טעם בתיקון המקום וגם החווה ננטשה.

בסיוור נסקור את מערכת ההשקיה של החווה ונכנס אל המערכת התת-קרקעית שגם בה קיימות עדויות לדפורמציה טקטונית.



איור 5: החווה האיסלמית במלחת עברונה

A. מפת מערכת ההשקיה של החווה (אחרי אבנר 1993)

B. פופיל (מעשה בעזרת EDM) של תעלת ההשקיה המקשרת בין מערכת הפונורות לברכת האגירה המראה את היפוך שיפוע התעלה עקב הרמת אזור הבריכה ביחס למוצא מערכת הפונורות

תחנה 9 המורפולוגיה של השוליים המזרחיים של מלחת עברונה

נסייר לאורך הגבול המזרחי של הרכס הרדוד (3-1 מ') החוצה את אגן עברונה מדרום לצפון. הרכס בנוי מסדימנטים של מלחה ובגגו נמצאה קרקע מלוחה המאפיינת סובב של פליות וסבחות בהם קיים מפלס מי תהום גבוה. גיל חלקו העליון של החתך המורם הוא 900-1000 שנה. אורך הרכס כ- 10 קמ' והוא מהווה חלק מרצועה מורמת שרוחבה 0.5-1.5 קמ' בה חשופים סדימנטים שהורבדו במלחה.

לראות אזור העובר כיום תהליכי סחיפה והתחתרות עקב היותו מורם מעט מעל סביבתו. בצד המערבי של האגן השתמר דגם החיגור המקורי של המלחה שהתקיימה כאן עד לפני כ- 900 שנה. את חגורת הגבס המקיפה את שולי האגן המערביים ניתן לזהות בעזרת הגוון הבהיר שלה והצמחיה שמצליחה להאחז בה. החלק המרכזי של המלחה בו שקעו בעיקר מלחים, חשוף לאורך הגבול וממזרח לו והוא בולט בגוון כהה ובהעדר צמחיה.

לאורך החלק המזרחי, הנמוך של אגן עברונה, התפתחה מערכת ניקוז רחבה המובילה את מי השטפונות של נחלים הזורמים לערבה הדרומית ממזרח וממערב, דרומה. מערכת זאת קולטת בין השאר את מי השטפונות של נחל רחם ונחל עברונה.

במבט צפונה ניתן לזהות מערכת אפיקים רדודים החוצים את האזור המורם של המלחה ממזרח לדרום-מערב. מערכת טרנסברסלית זאת התפתחה עקב חסימה שיצר חלקו הדרומי של הרכס המורם לנחלים הזורמים דרומה ואילץ אותם לחפש מוצא אלטרנטיבי. הערוצים חוצים את הרכס הרדוד לדרום מערב כאשר הם עוקבים אחרי אזורים סטרוקטורליים נמוכים. לאחר החציה נמשכת הזרימה דרומה לאורך שוליו המערביים של האזור המורם.

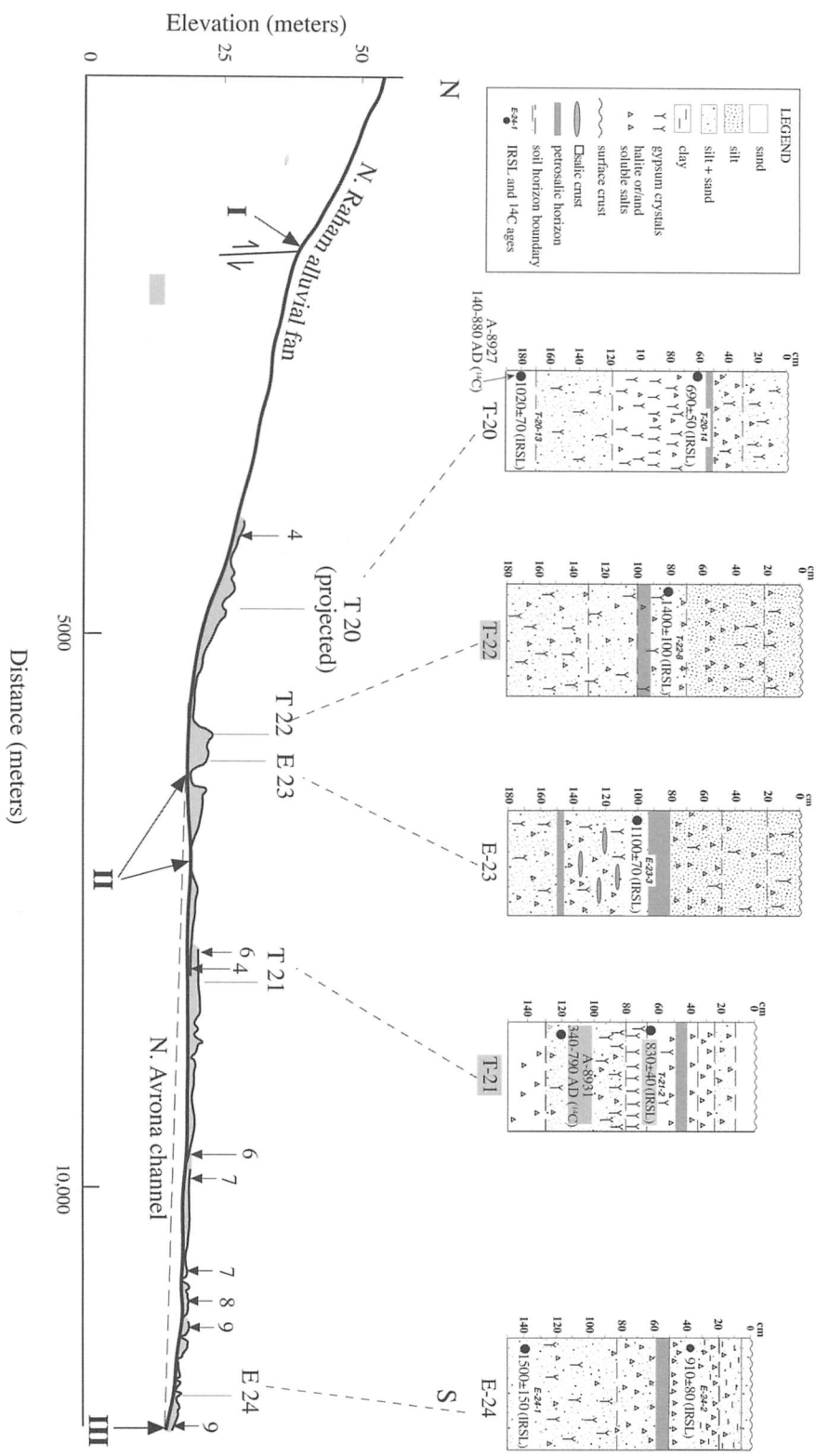
8 תחנה מערכת פוגרות מהתקופה המוסלמית (איור 5, אחרי ע. אבנר, 1993)

מערכת הפוגרות של עברונה הנה חלק ממערכת השקיה שהזינה חווה חקלאית מהתקופה המוסלמית הקדומה שהוקמה לאורך השוליים המערביים של מלחת עברונה על בסיס ידע וטכניקות שמקורן בפרס.

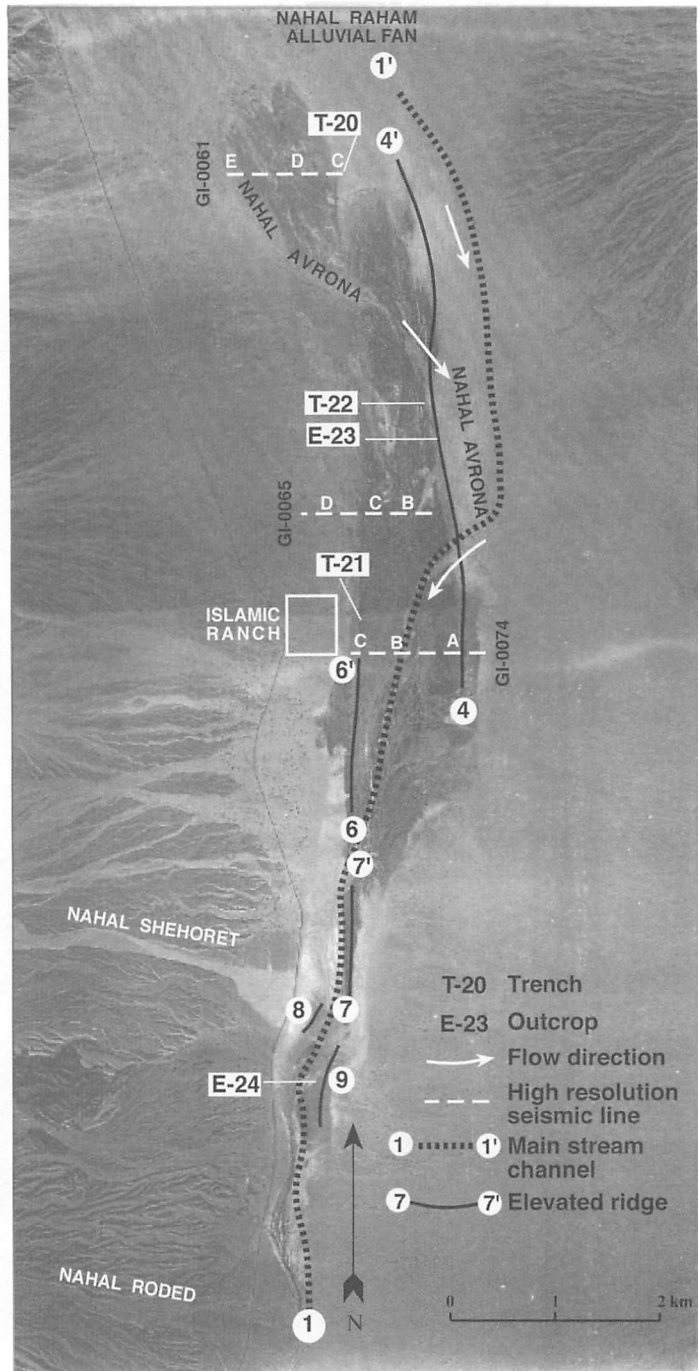
מערכת ההשקיה מורכבת ממערכת תת קרקעית ומערכת תעלות עילית. המערכת התת קרקעית כוללת שתי תעלות מקבילות, שניתן לעקוב אחריהן למרחק של מספר מאות מטרים בעזרת התלוליות של הפירים ששמשו לחפירה ותחזוקה של התעלות. מערכת זאת אספה מי תהום רדודים ממניפות הסחף שממערב וצפון מערב למלחה והובילה אותם לתעלה עילית, מקורה, דרכה זרמו המים לברכה מרכזית. מהברכה הזרמו המים לשדות בעזרת מערכת תעלות פתוחות. שטח האזור המושקה היה לפחות 2000 דונם ונמצאו בו שרידי גידולים כגון: תמרים, זיתים, שקדים, אפרסקים, חרבים וכן חיטה ושעורה.

חפירות שנעשו באתר העלו עדויות לשינויים שנעשו במערכת התעלות בזמן בנייתן וגם לאחר מכן ככל הנראה עקב מקים שנגרמו למערכת על ידי רעידות אדמה.

החווה ננטשה בתקופה בה חרבה אילה עקב רעידת האדמה של 1068. את עקבות רעידת האדמה ניתן למצוא במעוות שעבר האזור עליו בנויה מערכת ההשקיה העילית. כיום גבוהה



איור 4: פרופילים פוטורמטרים של איפק נהל עבודה והרכבים חורמים מבניים מסדרומנטים של פליטה, על הפרופילים סומנים המתחופים (E) והתעלות (T) בהם נבדקו ותוארכו הקרקעות (תופעות מרוקן תגליון של האיזון) שמתפתחו בפליטת עבודות לפני שעטברה והורמות. שימו לב לפרופיל הקמוח של נהל עבודות בין בקוודות II - III.



איור 3: תצלום אוויר של מלחת עברונה

על הצילום מסומנים: מיקום התגלות שימשו לאגליה פלאוסיימית, מחשופים שתוארכו בשית IRSL, קווי רפלקציה סייסמית (האותיות מסמנות את מיקום השברים בתת הקרקע), פרופיל פוטוגמטרי של נחל עברונה, פרופילים פוטוגמטרים של הבלוקים הסקטונים המורמים. השטח הכהה מבטא מחשופים של סדימנטים שהורדו בפלייה. שימו לב לקווים הישרים התוחמים את מחשופי הסדימנטים הכהים.

תחנה 5 תעלה 15 - שבר הולוקני המסיט מפלס אלוביאלי צעיר

שבר החוצה ומסיט מניפת סחף נטושה של יובל של נחל שחורת. המשכו הדרומי של שבר זה יוצר מדרגה בולטת במפלס הבוגר בו נחפרה תעלה 10. הגיל המשוער של המניפה הנטושה סוף פלייסטוקן או תחילת הולוקן מאחר שנשמרה על פניה המורפולוגיה הפלוביאליה המקורית של שרטונות ואפיקים, וקרקע הרג שהתפתחה בה מאז הנטישה אינה בוגרת.

התעלה חשפה עדות לארוע הסטה אחד בלבד, המאוחר להתפתחות הקרקע על המניפה, ולכן גילו המשוער הוא הולוקן (Gerson et al., 1993).

תחנה 6 שבר המהווה ביטוי לתזוזה אופקית לאורך שבר עברונה

שבר החוצה מניפה נטושה של נחל שחורת שגילה 14ka-30ka. סקר גיאופיסי העלה ששבר זה נמצא מעל התוואי העיקרי של שבר עברונה.

המניפה הנטושה של נחל שחורת החלה להתפתח כתוצאה מיצירת מערכת מתלולי השבירה, התוחמים במזרח את המפלס הפלייסטוקני הנטוש של נחל שחורת שגיל גו כ- 60 ka. לפיכך, מציין הגיל של חלקה התחתון של המניפה את זמן הארוע הטקטוני שיצר את המדרגה הטקטונית בשולי מלחת עברונה.

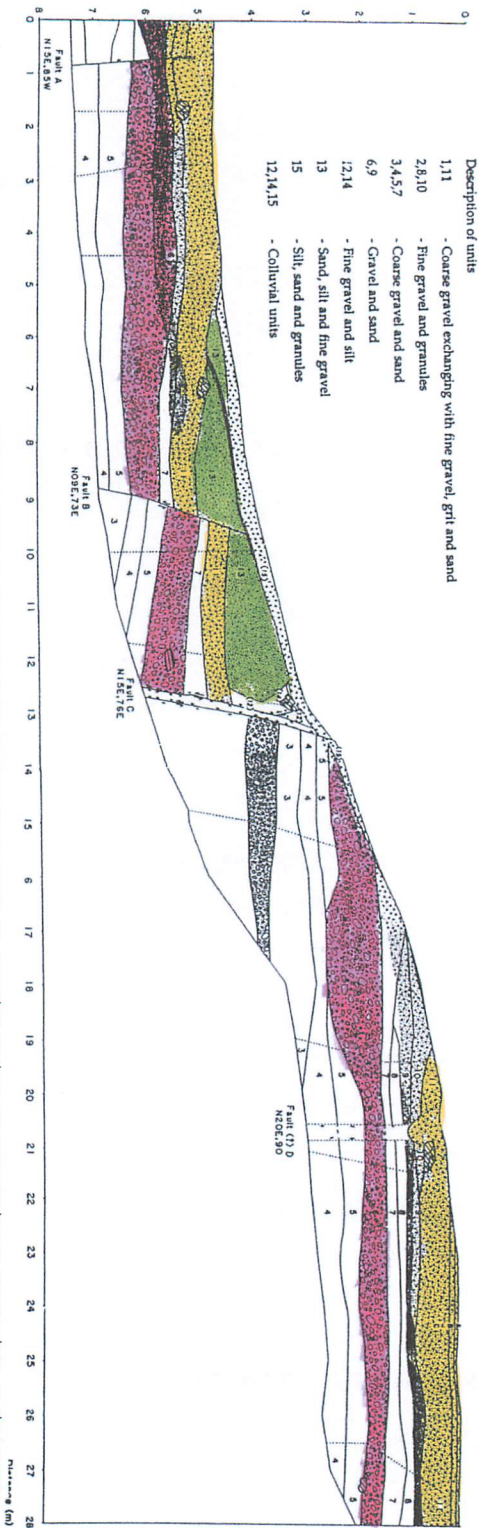
השבר מרים את האגף המזרחי של המניפה ויוצר מתלול הפונה מערבה. מכון טהור השפכים של אילת נבנה על גרובן קטן שהתפתח לאורך המשכו הדרומי של השבר, במרכז של מניפת שברים (Flower Structure) שהתפצלה מהשבר המרכזי. צפונה לאזור זה, נמצאו שברים הפוכים לאורך אותו קו שבר. הדגם הסטרונקטורלי של מערכת השבירה והמעבר ממבני לחיצה למבני מתיחה לסרוגין, מאפיין שברים בעלי רכיב תזוזה אופקי.

קו סייסימי שחצה את המניפה השבורה (Ben Gai et al., 1993) הראה ששבר זה הנו ביטוי לשבר עמוק המפריד בין אזור בו סלעי התשתית קרובים לפני השטח ממערב, לאזור בו קיים שקע שעומקו מאות מטרים ואף יותר במזרח.

בתעלה שנחפרה לרוחב הגרובן נמצאו עדויות למספר רעידות אדמה הולוקניות במגניטודות של 6-7. המדרון הנכחי של השבר עדיין לא התייצב והדבר מעיד על גילו הצעיר.

תחנה 7 תצפית מאזור הברכות על מלחת עברונה (איורים 3,4)

בתצפית ניתן לראות שהכינוי מלחה אינו מתאים כיום לאזור זה מאחר שאגן עברונה מנוקז למפרץ אילת והוא אינו אגן ניקוז סגור בדומה לזה הקיים במלחת יוטבתה. במרכז האגן ניתן



איור 2: תעלה 10 - תעלה שחפרה בנמצא לשבר תמסטי את קונולומיט מילי שחורת. את ההיסטה האנכית המצטברת משקף המרחק האנכי בין החודות הסטרטיוגרפיות הצמודות באחד וזו, תוצג של יחידות הנשענות על השבר (בתצורת בריק) משקף את ההיסטה האנכית באותו בודד.

תחנה 4 תעלה 10 - מתלול שבירה של העתק שכונת צפון-דרום (איור 2)

תעלה שנחפרה על מתלול שבר השייך למערכת שכונת צפון-דרום. שבר זה הנו אחד השברים הקדומים של מערכת זו. השבר מסיט קרקע רג שגילה 60-80 ka ויוצר מתלול שבירה שגבהו 4.5 מ'. ניתוח פאלאוסיימי של השבר איתר עדויות לשלושה ארועי שבירה שהראשון ביניהם היה מלווה בהסטה של 3 מ', המעידה על רעידה במגניטודה של 7.5. הגיל של השבר, כפי שהתקבל מניתוח שיפוע המתלול הוא $40 \text{ ka} \pm 6 \text{ ka}$ (Gerson et al., 1993).

מנקודה זאת ניתן לראות היטב את מתלולי השבירה לאורך השוליים המזרחיים של מניפת הסחף הפלייסטוקנית של נחל שחורת ואת הגבול הטקטוני בינה לבין אגן עברונה.

כיום מנוקזים השוליים המזרחיים של מאסיב רווד על ידי מספר נחלים קטנים, המקבלים את עיקר הסחף מסלעי המאסיב, ויוצרים מערכת של מניפות סחף בעלות גוון כהה.

תחנה 2 גבעות שחורת - מפלסים אלוביאליים נטושים

תצפית מגבעות שחורת על מערכת מניפות הסחף הפעילות והנטושות בחזית ההרים המערבית של הבקע. בולט ההבדל בין הגוונים הבהירים המאפיינים את מפלסי קונגלומרט גרוף לצבעים הכהים של המניפות הפעילות. לרגלי השוליים המערביים של גבעות שחורת עובר שבר שכוונו צפון מערב שצדו המערבי מונמך. השבר מסיט מפלס חלוקים הדומה לקונגלומרט גרוף. ליניאמנטים שכוונם דומה נמצאו במפלסים האלוביאליים הצעירים ממערב לגבעות שחורת.

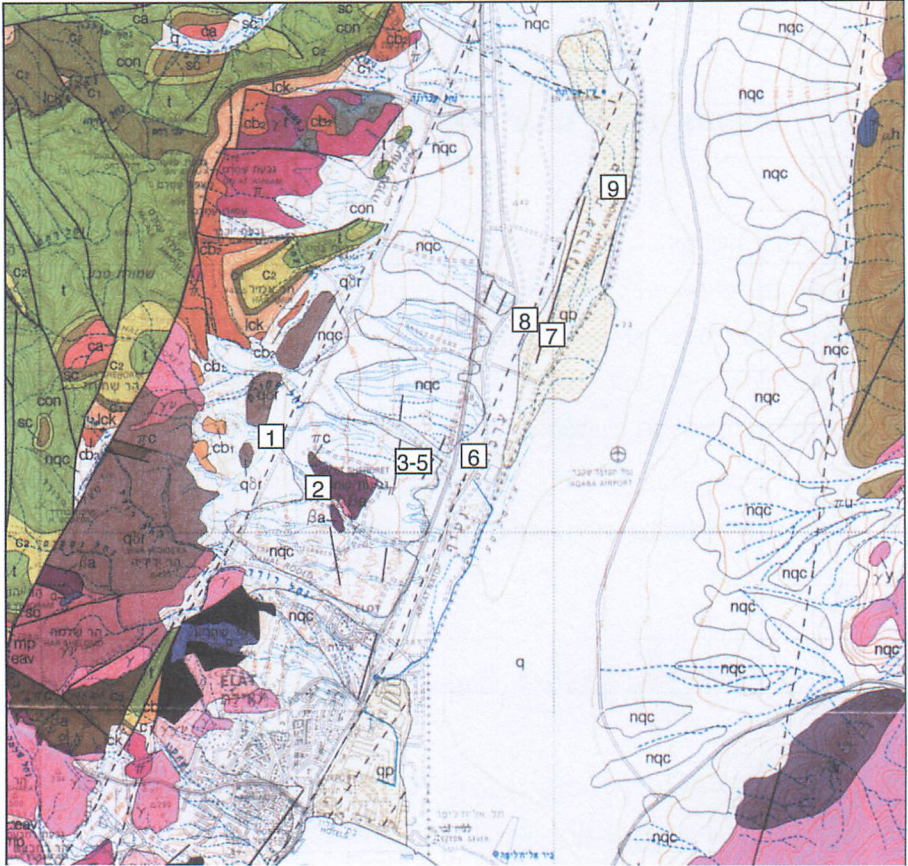
תחנה 3 תצורת אילות וקונגלומרט שחורת מוסטים על ידי שבר שכוונו צפון מערב

מחשוף של תצורת אילות ומעליה מונח באי התאמה קונגלומרט השייך למערכת הפלוביאלית מגיל פלייסטוקן מאוחר של מניפת נחל שחורת.

תצורת אילות מורכבת מסדימנטים דקי גרגר עם מספר אינטרקלציות של חלוקים. היא עשירה בגבישי גבס גדולים ומייצגת משקעי פלייה בשולי מניפת סחף. קיומו של אגן פלייה כקילומטר מערבית למלחת עברונה מצביע על כל שבתקופה זאת היו שולי אגן הניקוז הפנימי של הערבה הדרומית, מערבית למיקומם הנוכחי. מאוחר יותר, עקב תקופה של יציבות טקטונית ומילוי האגן בסדימנטים, מדחק בסיס הניקוז של מניפת הסחף הפלייסטוקנית של נחל שחורת מזרחה והיא כיסתה את אגן הפלייה הקודם בסדימנטים פלוביאליים גסי גרגר.

הגיל של גג הסדימנט הפלוביאלי הצעיר הוא $135 \text{ ka} \pm 15 \text{ ka}$.

כל החתך החשוף כאן, הוסט על ידי שבר המוריד את הבלוק הדרום מערבי. שבר זה שייך למערכת השבירה שכוונה צפון מערב, ופעילותו קדומה לזו של מערכת השברים שכוונה צפון-דרום (Gerson et al., 1993).



איור 1: מפת תחנות הסיור
 מפה גיאולוגית: גרפונקל ועמיתיו (2000) המכון הגיאולוגי, ירושלים

תחנה 1 טרסות לאורך שבר יתם

תצפית מאחת הטרסות הגבוהות לאורך שבר יתם אל מניפות הסחף הנטושות והפעילות של נחל רודד ונחל שחורת.

מנקודת התצפית ניתן לראות חלוקים שנגזרו מסלעים של חבורת יהודה החשופים בגרנן שלמה ממערב למאסיב רודד. יחידות חלוקים אלה שייכות ככל הנראה לקונגלומרט גרוף. הפיזור של מערכת הטרסות הגבוהות רק ממערב לתוואי המשוער של שבר יתם, מעלה אפשרות לפעילות סקטונית לאורכו לאחר הרבדת קונגלומרט גרוף.

זאת, מצביעים על קיומם של שברים הנמשכים לעומק של מספר קילומטרים (Gai et al., 1993).
(Ben).

שבר יותם אינו יוצר ליניאמנט במפלסי הסדימנטים הצעירים, אך הוא מפריד בין מדרגת נוף גבוהה המכוסה בקונגלומרט גרוף בצדו המערבי, לבין מפלסים נמוכים של קונגלומרטים ממזרח לתוואי המשוער של השבר. סקר סיימי בהפרדה גבוהה (Resolution Seismic Reflection) (High) שחצה את תוואי השבר, זיהה מתחת למניפות הסחף הצעירות מערכת מסועפת של שברים המסיטים יחידות אלוביאליות עד סמוך לפני השטח (שטיבלמן, המכון הגיאופיסי לישראל, בהכנה).

מערכת השבירה הצעירה במרחב רווד-שחורת תחומה בין שני קוי שבירה עיקריים: שבר יותם, ושבר עברונה. עיקר פעילותו של שבר יותם, הנמשך לאורך חזית ההרים המערבית של הבקע, קודמת להרבדת קונגלומרט גרוף, ואילו שבר עברונה, שהנו חלק משבר ים המלח, מעתיק יחידות שגילן צעיר מאלף שנה.

פעילות טקטונית

ניתוח פאלאוסיימי ומורפולוגי (Fault-Scarp-Degradation Modeling) של מערכת השברים הצעירה, מצביע על כמה מגמות בפעילות הטקטונית: (1) מערכת השברים שכוונה צפון מערב, קדמה למערכת השברים שכוונה צפון-דרום. (2) במערכת שכוונה צפון-דרום, נמצאה מגמה של דעיכת הפעילות הטקטונית על גבי השברים המערביים עם הזמן, כלומר: הפעילות של שברי השוליים נודדת עם הזמן מזרחה כלפי שבר עברונה. (3) עיקר הפעילות ההולוקנית מרוכזת לאורך אזור הגזירה של שבר עברונה. (4) על גבי שברי השוליים נמצאו הסטות אנכיות (בארוע בודד) בסדר גודל של עד 1.5 מ', המעידות על רעידות אדמה במגניטודה של 7. (5) שבר עברונה היה מוקד לרעידת אדמה במגניטודה של כ- 7.5 שארעה לפני כ- 900 שנה, שגרמה להיפוך תבליט במלחת עברונה והפכה אותה מאגן ניקוז סגור לאגן פתוח המתנקז למפרץ אילת. נראה שזאת הרעידה של שנת 1068, שלפי דיווחים היסטוריים גרמה להרס רב ברדיוס העולה על 500 קמ' מאזור אילת. ברעידה זאת חרבה כליל העיר אילה שהתקיימה באתר הנוכחי של עקבה.

(Porat et al., 1995; Amit et al., 1995). במזרח, הוא שבור על ידי מערכת העתקים נורמליים, היוצרים סדרה של מתלולי שבירה שגובהם המצטבר עולה על 20 מ'. לאורך מתלולי שבירה אלה נמצא המוצא של מניפת נחל שחורת וכן מניפות של מספר נחלים קטנים המנקזים את מפלסי קונגלומרט נחל שחורת. בצפון, מכוסה מפלס זה על ידי מניפות סחף פעילות.

סדרה של מפלסים המורמים מטרים ספורים מעל מערכת האפיקים הנוכחית, מלווה את נחלי שחורת ורודד. לסדרה זאת שייכת מניפת סחף של נחל שחורת שנבטשה לפני כ- 14 ka.

תופעה הראויה לתשומת לב, הוא ההבדל בין שיפוע הנחלים כיום לבין השיפוע של מניפות הסחף הנטושות של קונגלומרט גרוף וקונגלומרט שחורת. הנחלים רודד ושחורת זורמים לדרום מזרח, בניצב לאגן עברונה, שכוונו צפון מזרח. לעומת זאת, השיפוע של המפלסים הנטושים של מניפות גרוף ושחורת, ממערב לשברי השוליים של אגן עברונה, הוא למזרח. ניתן להסביר זאת על ידי שינוי מיקומו של בסיס הניקוז או על ידי הטיה של האזור לצפון לאחר הרבדת קונגלומרט שחורת.

אגן עברונה, מהווה את בסיס הניקוז הנכחי של האזור. את מרכזו של אגן עברונה חוצה כיום רכס המורם בשיעור של 1-3 מ מעל האפיקים הפעילים. רכס זה בנוי מסדימנטים שהורבדו בפלייה והוא הורם עקב פעילות טקטונית צעירה, ככל הנראה ברעידת האדמה של 1068

(Amit et al., 1999; Zilberman et al., in press).

מערכות השבירה

את מפלסי מניפות הסחף הנטושות חוצות שתי מערכות שברים, המורכבות בעיקר משברים נורמליים המצביעים על משטר מתיחה, אם כי במקומות אחדים יש עדויות למאמצי לחיצה מקומיים. מערכת שכוונה הכללי צפון מערב, בולטת בעיקר באזור שבין נחל רודד ונחל שחורת, ומערכת שכוונה הכללי צפון-דרום עד צפון צפון מזרח, יוצרת שברי מדרגות בעיקר בחלקו במזרחי של האזור. מערכת זו נמשכת מאילת צפונה עד לאזור בו מכסות מניפות סחף פעילות את המניפות הנטושות. של נחל שחורת.

לאורך המערכת שכוונה צפון מערב, ירוד בדרך כלל הבלוק הדרום מערבי, בעוד שהמערכת שכוונה צפון-דרום, יוצרת בעיקר שברי מדרגות למזרח וכן גרביים והורסטים קטנים.

מערכת שבירה נוספת מלווה את התוואי של שבר עברונה, שהוא חלק משבר ים המלח. שברים אלה מעתיקים יחידות מגיל פלייסטוקן עליון והולוקן ומלווים במבני לחיצה ומתיחה לסרוגין. באזור מלחת עברונה, יוצר השבר מערכת גזירה ברוחב של 0.5-1.5 קמ', המורכבת ממספר שברים תת-מקבילים. צפונה משם, נמשך קו שבר רציף, מדורג, עד למלחת יוטבתה (1968) (Zak and Freund, 1966; Freund and Zak,).

טרסות ומניפות סחף מגיל פלייסטוקן מאוחר

לאורך נחל רווד ונחל שחורת, בשולי האפיקים, נשמרו שרידי טרסות פלוביאליות המייצגות את שלבי ההתחזרות של מערכות הניקוז הנוכחיות במניפות הסחף הפלייסטוקניות הנטושות. במוצא נחל שחורת הגיל של סדימנטים אלה הוא פלייסטוקן מאוחר (12 ka-30 ka).

סדימנטים הולוקניים

בתקופת ההולוקן הצטברו סדימנטים בעיקר בפליות של עברונה ויוטבתה, שהתפתחו באגנים סטרוקטורליים משני צידי פרשת המים של מניפת הסחף של נחל רחם. עובי החתך שהצטבר בתקופה זאת היה 3-4 מ' והוא מורכב בעיקר מחול עם סטרוקטורות פלוביאליות ושכבות חרסית. החתך מכיל גבס המפוזר לרוב בצורת תצבירי גבישים ביחידות השונות וכן מלח היוצר במקומות אחדים אופקים דקים.

מספר מפלסים גיאומורפיים בולטים, המייצגים תקופות של יציבות טקטונית, ניכרים במישורים

מפלסים גיאומורפיים

הפלוביאליים ממזרח לקו שבר יותם.

המפלס הגבוה ביותר מזוהה עם גג קונגלומרט גרוף והוא נמשך ברציפות החל מאזור נחל שלמה ונחל גרוף בדרום ועד גבעות שחורת בצפון. באזור שבין נחל רווד לנחל שחורת, ממערב לשבר יותם, פזורים שרידים של קונגלומרט גרוף על סדרת מפלסים, המורמים מעל האזור שממזרח לקו בשיעור העולה על 10 מ'. הגבול המזרחי של מפלס זה הוא מתלול שבר העובר במקביל לכביש לאילת ממערב לו, בין נחל רווד לשולי מפרץ אילת (גרפונקל, 1970). מתלול שבירה זה מהווה את המוצא של מניפת נחל רווד.

מפלסי נחל שחורת משתרעים בין גבעות שחורת ממערב לאזור גבעות בהט בצפון. המפלס הגבוה ביותר נמצא בסמוך לשוליים הצפוניים של גבעות שחורת והוא מהווה מפלס ביניים בין קונגלומרט גרוף, המשתרע מדרום לגבעות שחורת, לבין המפלס העיקרי של נחל שחורת, המשתרע מצפון לו. גיל מפלס זה עולה על יכולת התארוך בשיטת הלומיניסנסיה והוא כנראה עתיק מ-200 ka.

המפלס הנרחב ביותר של נחל שחורת משתרע מצפון לגבעות שחורת. בחלקו העליון התפתח פרופיל בוגר של קרקע רג המצביע על חשיפה ממושכת לאקלים צחיח (Amit et al., 1995) et al., 1993). הגיל של חלקו העליון של המפלס הוא 60-80 ka (Gerson et al., 1995).

גיל הקונגלומרט אינו ידוע בודאות, אך גרפונקל (1970) מייחס לו גיל פליוקני ורואה בו חלק ממחזור ההשקעה של קונגלומרט הערבה בנגב הדרומי.

הקונגלומרט משקף שלב בהתפתחות הנוף בו מחשופי מאסיב רווד היו קטנים יותר ותרמו מעט תוצרי בלייה לאגני הניקוז. הכיסוי הנרחב של הקונגלומרט ועוביו מצביעים על שלב של יציבות טקטונית אשר לווה בהצטברות חומרי סחף בבקע ובשוליו, כולל בתוך הקניונים של הנחלים החתורים בחזית ההרים המערבית של הבקע.

קונגלומרט נחל שחורת

קונגלומרט נחל שחורת חשוף לאורך רצועה שאורכה (בכוון צפון-דרום) כ- 5 קמ', המשתרעת בין גבעות שחורת בדרום לגבעות בהט בצפון, ובין הקו של שבר יותם במערב, למערכת מתלולי השברים בשולי מלחת עברונה במזרח. חלקו התחתון אינו חשוף ואופי המגע בינו לבין קונגלומרט גרוף שמדרום לו אינו ברור. בצפון הוא מכוסה על ידי מערכת מניפות סחף פעילות.

הקונגלומרט מורכב בחלקו התחתון מסדימנטים סילטים-חרסיתיים, ובחלקו העליון ומשכבות של סדימנטים פלוביאליים גסים. הוא מכיל שרידי קרקעות רג המלוות אי התאמות ארוסיביות בחתך. חלקו התחתון של החתך עתיק מ- 100,000 שנה ובגגו התפתחה קרקע רג שגילה כ- 60,000 שנה (Gerson et al., 1993; Amit et al., 1995; Porat et al., 1995).

חלקו התחתון של החתך הורבד ככל הנראה באגן ניקוז סגור, כנראה פלייה, וחלקו העליון במערכת של מניפות סחף קדומות של נחל שחורת ומספר נחלים קטנים המנקזים את מאסיב רווד.

הקונגלומרט מייצג את סיומו של שלב טקטוני שהחל בהשתפלות האזור שמצפון לגבעות שחורת והתפתחות אגן ניקוז מקומי באזור שמצפון מזרח להן. לאחר מכן כוסה האגן בהדרגה על ידי מניפות סחף שתחילתן לאורך הקו של שבר יותם והן יוצרות משטח פלוביאלי רציף שהשתרע בעבר עד מרכז הערבה.

שברים סינ-סדימנטריים ומישורי גידוע מלווים בשרידי קרקעות שנמצאו בחתך, מצביעים על קיומה של פעילות טקטונית מתמשכת בזמן הרבדת היחידה. לאחר נטישת מניפת הסחף והתפתחות קרקע רג בוגרת בגגו, התחדשה בסוף הפלייסטוקן הפעילות הטקטונית ויצרה מערכת מתלולי שבירה המפרידה בינו לבין אגן עברונה.

תצורת אילות (לסמן ולנגוצקי, 1961)

תצורת אילות היא היחידה היבשתית הנאוגנית העתיקה ביותר החשופה באזור אילות. בסיסה לרוב אינו חשוף, אך מצפון לאילות היא מונחת ישירות על מישור גידוע בג סלעי מאסיב אילות. מעליה מונח קונגלומרט גרוף באי התאמה אירוזיבית, ובמקומות אחדים אף באי התאמה זויתית (גרפונקל, 1970).

תצורת אילות בנויה לרוב מסדימנטים קלסטים דקים: חילופין של חול גס ודק, סילט וחרסית, עם אינטרקלציות של סדימנטים אלוביאליים גסים שמקורם בסלעי הסביבה. במקומות אחדים, ניתן למצוא שכבות של סלעים דקי גרגר עשירים בגבישי גבס גדולים, שהתגבשו בתוך הסדימנט. בדרך כלל, אין יחידה זאת מכילה פאונה, אך במספר מקומות נמצאו בה מעט אוסטרקודים של מים ברקיים ויחידות טרוורטין (גרפונקל, 1970). באזור אילות, נמצאו ביחידה זאת חוואר ירקרק-צהבהב וגירים המכילים שברי פאונה של מים מתוקים (גינת ועמיתיו, 1994).

תצורת אילות הורבדה ככל הנראה בלגונות רדודות וסבחות בשולי מפרץ אילות. גיל התצורה אינו ידוע, אך היא שקעה בנוף הדומה לנוכחי ולכן היא מאוחרת ליצירת מבני השוליים העיקריים של הבקע (גרפונקל, 1970).

קונגלומרט גרוף (גרפונקל, 1970)

קונגלומרט גרוף מונח באי התאמה על תצורת אילות. הוא מכסה שטחים נרחבים מדרום לגבעות שחורת וניתן לעקוב אחריו מערבה אל תוך עימקי הנחלים המנקזים את מאסיב רודד. קונגלומרט זה שקע במערכת מניפות סחף בשולי חזית הרים המערבית של הבקע, בנוף הדומה לנוכחי. הרכב החלוקים המאפיין אותו באזורים השונים משקף את הסלעים שהיו חשופים באגני הניקוז המקומיים בזמן הרבדתו. באזור נחל גרוף עוביו כ- 50 מ' וכמות החלוקים הגסים בו עולה כלפי גג החתך, המורכב מיחידה של בולדרים בקוטר של עד 3 מ' (גינת ועמיתיו, 1994).

הקונגלומרט חשוף לאורך נחל רודד, שם הנו פולימיקטי, עשיר בחלוקים שנמרו מחבורת יהודה, שמקורם ככל הנראה בגרובן שלמה ממערב למאסיב רודד ובגרובן יותם. בחתך הקונגלומרט, בעיקר בחלקו הצפוני, משולבות קרקעות קלציות.

המאפיין את מחשופי קונגלומרט גרוף הוא צבעם הבהיר הנובע מריבוי החלוקים הקרבונטים. מערכות הניקוז הפעילות כיום באזור מובילות כמות גדולה של סחף שמקורו במאסיב רודד ולכן צבע הסדימנטים הצעירים לקונגלומרט גרוף הנו כהה יותר.

מבוא

הסיור יערך לרחב רצועת המירה של שבר ים המלח בין שבר יותם במערב למניפת נחל שחורת ושברי מלחת מלחת עברונה במזרח.

במסגרת הסיור נסקור את מערכות השבירה השונות המלוות את שולי הבקע ונעמוד על המאפיינים הטקטוניים שלהן. כמו כן נעמוד על התפוצה המרחבית של הסדימנטים והמפלסים האלוביאליים של מניפות הסחף הקדומות (פליו-פלייסטוקניות) והצעירות (פלייסטוקן מאוחר-הולוקן) לאורך שולי הבקע ויחסם למערכות השברים והפאזות הטקטוניות ששיצבו את הנוף הנוכחי.

רקע גיאולוגי

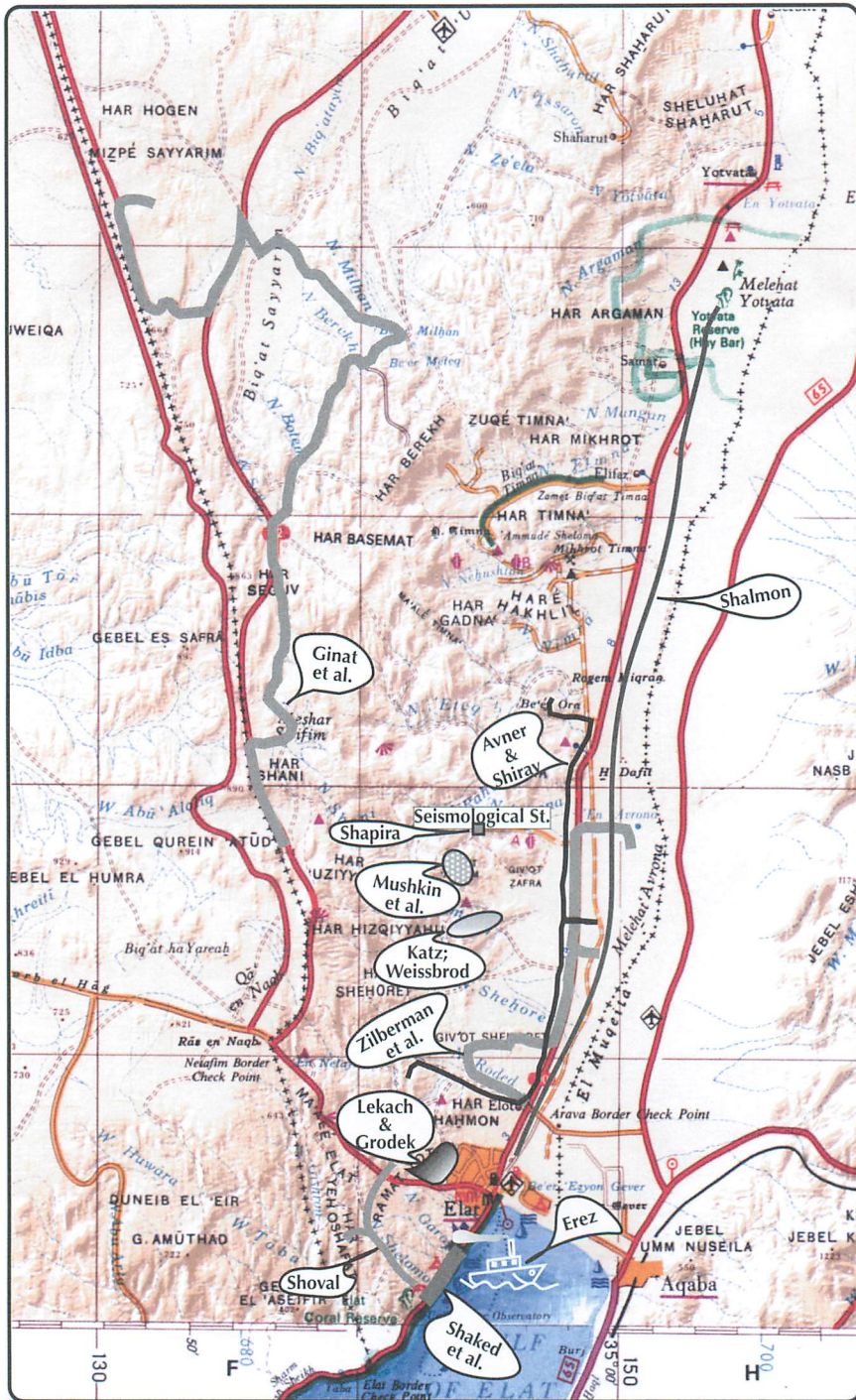
אזור הסיור משתרע ממזרח למאסיב רווד, לאורך השוליים הצפוניים של מאסיב אילת (כפי שהוגדר על ידי גרפונקל, 1970), בין נחל רווד לנחל שחורת.

אזור זה מכוסה בסדימנטים פלוביאליים שהורבדו במערכת מניפות סחף מגיל פליוקן ופלייסטוקן של נחלי שחורת ורווד, שהחלו להתפתח ממזרח לשבר יותם לאחר יצירת הבקע, ככל הנראה בפליוקן. במזרח, בסמוך לכביש לאילת, מתאצבעים הסדימנטים הפלוביאליים עם סדימנטים דקי גרגר שהורבדו באגני ניקוז סגורים (פליות) שהתפתחו באגנים טקטוניים במרכז הבקע.

סטריגרפיה

החתך הסדימנטרי החשוף באזור זה כולל סדימנטים אלוביאליים צעירים, שגילם המשוער פליוקן - הולוקן. היחידות הקדומות ביותר הן תצורת אילות וקונגלומרט גרף, שגילם המשוער פליוקן (גרפונקל, 1970). צעיר מהם קונגלומרט נחל שחורת שגילו פלייסטוקן תיכון עד פלייסטוקן מאוחר. תקופת ההולוקן מיוצגת על ידי סדימנטים שהורבדו בפליית עברונה ובמניפות הסחף של הנחלים שהתנקזו אליה.

חיקום ומסלולי הסיורים





תוכן העניינים:

באנטקטוביקה ומורפולוגיה טקטונית בשוליים המערביים של הערבה הדרחמית - סיור משבר יום לשבר עבחנה.

7 עזרא זלברמן, רבקה אמית, יואב נחמיאס

העתקים באבן חול והתפתחותם, הר אמיר, דרום ישראל

23 יורם כץ, רמי ויינברג, אברהם סטרינסקי

סביבות השקעה ומאובני עקבות באבן החול של תצורת אמיר מבט על משטח גאות ושפל אוהנטי מתקופת הקרטיקון התחתון

35 טוביה ויסרוד, עמוחי סנה

חוף אילת: אלמוגים, סדימנטים וטקטוביקה

43 יוני שקד, בועז לוד, כרמית כהן, אמוץ ענן, שמוליק מרקו, מוטי שטיין

טקטוביקה ויצעב הסף בגב הדרחמי, בשולי העתק מלחן

59 חג גנת, עמית שגב, מיסאל ביט

גיאורכיאלוגיה באזור אילת

73 עוז אבנר, משה שירב

הדגמת סיור גאולוגי לימודי לסלגים המגנטיים והמותמרים של קמפוס אילת ומל שלמה

81 שלמה שובל

הרים, ערים ומיפוט סחף

89 יהודית לקח, תמיר גודקן .

סיור גאודטי באזור אילת

97 יוסי מלצר, גתשן שטיינברג, מרס שירמן, אבי שפירא, דב חזן

The Geological History of Amram Massif, Southern Israel

120 Amit Mushkin, Oded Navon, Moti Stein, and Ludwig Halicz

**החברה הגיאולוגית הישראלית מודה לחוסדות הבאים על השתתפותם ותרומתם לכנס
החברה באילת:**

משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי
רציו חיפוש נפט בע"מ
נשר מפעלי מלט ישראלים בע"מ
רותם אמפרט נגב בע"מ
נגב מינרלים תעשייתיים בע"מ
חברת השמל
ישראלמקו אינק
דלק מערכות אנרגיה בע"מ
נורדן טכנולוגיות בע"מ
סיסטמטיקס טכנולוגיות
ד"ר אורי גוליק מיכשור כימי
גיאופרוספקט בע"מ
תהל מהנדסים יועצים בע"מ

חברי ועד החברה הגיאולוגית לשנת 2001:

נשיאה - רבקה אמית
סגן נשיאה - גדעון בר
מרכז פעולות - זוהר גבירצמן
מזכיר - יואב נחמיאס
מנהל אתר האינטרנט - דב לנסקי
מזכיר - מאיר אבלסון

מנהל קרן ע"ש ד"ר פרץ גדר ז"ל - דב גימבורג

החברה הגיאולוגית מודה לאלו רם מהמכון הגיאולוגי על שאפשר לנו שימוש באוסף המאובנים
שבאחריותו.

כנס החברה הגיאולוגית ותאגידות ישראלית

2001

תחילת

עריכה:
מאיר אבלסון

כ"ה-כ"ז באדר תשס"א
2001.3.22-20

ס י ו ר י ם



כנס החברה הגיאולוגית

2001

אילת

כנס החברה הגיאולוגית תואצומיה הישראליית

2001

תואצומיה

מדריך סיורים

